

Astrid Aarstrand

Referansemodell for pålitelig estimering av energi- og effektbehov for kontorbygninger på områdenivå

Masteroppgave i Energibruk og energiplanlegging

Veileder: Natasa Nord

Juni 2019

Astrid Aarstrand

Referansemodell for pålitelig estimering av energi- og effektbehov for kontorbygninger på områdenivå

Masteroppgave i Energibruk og energiplanlegging
Veileder: Natasa Nord
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosesssteknikk

 **NTNU**
Norwegian University of
Science and Technology

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2019 ved Institutt for Energi- og prosessteknikk på Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet (NTNU) i Trondheim. Rapporten vektlegges med 30 studiepoeng, og rettes mot pålitelig estimering av energi- og effektbehov i bygninger på områdenivå, etter idé fra Aslpan Viak v/ Jens Tønnesen.

Jeg vil takke min hovedveileder, Natasa Nord, for gode innspill og for å ha tatt seg tid til å veilede meg i sitt sabbat-år. Jeg vil også takke ekstern veileder Jens Tønnesen for engasjement og oppfølging.

Til slutt vil jeg takke John Clauss for god hjelp i simuleringsprogrammet IDA ICE. Takk til venner og medstudenter, og andre bidragsytere fra SINTEF og NTNU, med innspill og svar på mine spørsmål.

Trondheim, 10.06.2019

Astrid Aarstrand

Astrid Aarstrand

Sammendrag

Energibruk i bygninger står i dag for minst en tredjedel av verdens energiforbruk, og i utviklingen av en klimavennlig bygningsmasse har det blitt mer vanlig med prosjektering av energieffektive bygningsområder. Parallelt går Norge mot et mer elektrifisert samfunn, og dette fører til et økende effektbehov i kraftnettet, noe som kan bli et problem i mange områder. For å imøtekomme disse retningene samtidig, er det et behov for å kunne estimere pålitelige energi- og effektprofiler for bygninger på områdenivå.

Målet med oppgaven er å utvikle en brukervennlig metode for å estimere timesprofiler av varme- og elektrisitetsbehov for et bygningsområde. Metoden som er utviklet baserer seg på en blanding av fysisk modellering med IDA ICE og en matematisk informasjonsbasert tilnærming gjennom Microsoft Excel og Monte Carlo-simulering.

Opgaven tar utgangspunkt i kontorbygninger, med fokus på samtidighet på grunn av forskjellig drift og bruk av bygninger. Innenfor samtidighet baseres deler av resultatene på en sammenlagningsfaktor, som vil si at når topplasten inntreffer i en bygning, vil den ikke nødvendigvis inntreffe på samme tidspunkt i en annen bygning. Når timesprofilene da legges sammen vil effektbruken som funksjon av antall bygninger gå ned. Kort oppsummert består metoden av følgende oppskrift:

1. Finne kilder med utgangspunkt i valgt referansebygning, som er basert på standarder, fagbøker og forskning. Deretter samles informasjon innenfor bygningsgeometri, bygningskropp, tekniske systemer, samt drift og bruk.
2. Referansebygningen simuleres i IDA ICE og typiske bruksvariasjoner for kontorbygninger etableres. Disse variasjonene implementeres som egne versjoner av referansebygningen og simuleres i IDA ICE separat.
3. Informasjon om varme- og elektrisitetsbehov hentes fra resultatene i IDA ICE og overføres til Microsoft Excel. Et gjennomsnitt og standardavvik defineres for hver time i løpet av et år, og benyttes i Monte Carlo-simuleringen. I tillegg vil to ulike stokastiske sannsynlighetsverdier, avhengig av om tidspunktet er i- eller utenfor driftstid, skape tilfeldige variasjoner mellom bygningsprofilene.
4. Ønsket antall bygningsprofiler produseres med Monte Carlo-simuleringen og hver bygning aggregeres til en felles energi- og effektprofil for hele området.

Metoden resulterte i en sammenlagningsfaktor på 0,89 for varmebehovet til et område med 80 kontorbygninger. I tillegg gjorde aggregeringen det mulig å estimere maksimal effekt per bygning fra en usikkerhet på 32-40 kW, til mer presist 32 kW. Tilsvarende for elektrisitetsbehovet, en sammenlagningsfaktor på 0,86 og en usikkerhet mellom 36-44 kW maksimal effekt til mer presist 34 kW per bygning.

Abstract

Energy use in buildings accounts for at least one third of the world's energy consumption today, and in the development towards a climate-friendly building stock, it has become more common to design energy efficient building areas. In parallel, Norway is moving towards a more electrified society, and this leads to increasing load demand in the power grid, which may be a problem in many areas. To meet these two directions at the same time, it is necessary to estimate reliable energy- and load profiles for buildings at area level.

The goal of the thesis is to develop a user-friendly method to estimate hourly profiles of heating and electricity demands for an area of buildings. The method is based on a mixture of physical modeling with IDA ICE and a mathematical information-based approach through Microsoft Excel and Monte Carlo simulation.

The research is based on office buildings, with focus on concurrency due to different operations and use of buildings. Parts of the results are based on the coincidence factor, this means when the peak load occurs in one building, it will not necessarily occur at the same time in another building. Then, when the hour profiles are added together, the load demand as a function of the number of buildings will decrease. The method consists of the following recipe:

1. Finding sources based on a chosen reference building, which is a building based on standards, subject books and research. Information is then gathered within the topics building geometry, building body, technical systems and operation and use.
2. The reference building is simulated in IDA ICE and typical variations of use for office buildings are established. These variations are implemented as separate versions of the reference building and are simulated in IDA ICE.
3. Information on heating and electricity demands is obtained from the results in IDA ICE and transferred to Microsoft Excel. A mean value and standard deviation are defined for each hour of the year and used in the Monte Carlo simulation. In addition, two different probability values will create random variations between the building profiles, depending on whether its inside or outside operating hours.
4. The desired number of building profiles is produced with the Monte Carlo simulation and each building is aggregated into a common energy and power profile for the entire area.

For the heat demand and an area of 80 office buildings, the method resulted in a coincidence factor of 0,89. In addition, the aggregation made it possible to estimate the maximum load per building more precisely to 32 kW, starting with an uncertainty between 32-40 kW. Correspondingly for the electricity demand, it resulted in a coincidence factor of 0,86 and a precise maximum load of 34 kW per building, starting with an uncertainty of 36-44 kW.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurliste	vii
Tabelliste	ix
Tekniske begreper og forkortelser	x
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 Problembeskrivelse og mål for oppgaven	3
1.3 Struktur	3
1.4 Oppgavens begrensninger	4
2 Fremtidige kontorbygninger	5
2.1 Energibruk	5
2.2 Energieffektivisering	7
2.2.1 Tiltak i Trondheim	8
3 Energikrav og standarder	10
3.1 Byggteknisk forskrift fra 2017	10
3.2 Byggteknisk Spesifikasjon 3031 og Passivhusstandard for yrkesbygninger	11
3.3 Norsk Standard for inneklime, EN 15251	11
3.4 Historisk og fremtidig utvikling av lovkrav	13
4 Tekniske systemer og elektrisitetsforbruk i kontorbygninger	15
4.1 Energiforsyning	15
4.1.1 Solenergi	15
4.1.2 Termiske energibærere	16
4.1.3 Fjernvarme	16
4.2 Rør- og ventilasjonssystem	16
4.3 Viktigheten av nøyaktig estimat av energi- og effektprofiler	17
5 Drift og bruk av kontorbygninger	20
5.1 Brukerprofiler i Byggteknisk Spesifikasjon, TS 3031	20
5.2 Variasjon i drift og bruk	21

5.3	Definisjon og modellering utgitt av International Energy Agency	22
5.3.1	Modelleringsverktøy for brukerprofiler	22
6	Energiplanlegging i prosjektering av nybygg	25
6.1	Bygningssimulering i IDA ICE	26
6.2	Definisjon av en referansebygning	26
6.3	Kalibrering av en referansebygning	28
6.4	Kommunikasjon med byggherre	29
7	Energiplanlegging av større bygningsområder	31
7.1	Sammenlagningsfaktor	31
7.2	Statistiske prediksjonsmetoder for energibruk	33
7.2.1	Energi- og effektprofiler basert på regresjon utviklet av ZEN	33
7.2.2	Microsoft Excel og Monte Carlo-simulering	34
8	Metode for utvikling av referansebygning	36
8.1	Generell casestudie og datainnhenting	36
8.2	Etablering av referansebygning	36
8.2.1	Bygningsgeometri	37
8.2.2	Bygningskropp	39
8.2.3	Drift og bruk	40
8.2.4	Tekniske systemer	41
8.3	Analyse av referansebygning	43
9	Resultater fra referansebygningen	46
9.1	Varmebehov	46
9.2	Elektrisitetsbehov	49
9.3	Oppsummering	50
10	Metode for utvikling av referansemodell	53
10.1	Modellering av variabel drift og bruk	53
10.1.1	Brukernes bevegelsesmønster	53
10.1.2	Brukernes interaksjon med bygningen	54
10.2	Analyse av energi- og effektprofiler for variabel drift og bruk	57
10.2.1	Varmebehov	57
10.2.2	Elektrisitetsbehov	60
10.3	Modell for energi- og effektprofiler på områdenivå	62
10.3.1	Driftsvariasjoner fra IDA ICE	63
10.3.2	Monte Carlo- metode 1 med konstant sannsynlighet	64

10.3.3	Monte Carlo- metode 2 med variabel sannsynlighet	65
10.3.4	Monte Carlo- metode 3 med blandet sannsynlighet	66
10.3.5	Oppsummering av profil for varmebehov	68
10.3.6	Oppsummering av profil for elektrisitetsbehov	70
11	Resultater fra aggregert modell av flere kontorbygninger	72
11.1	Varmebehov	72
11.2	Elektrisitetsbehov	73
11.3	Generell oppsummering av metode	74
12	Diskusjon	76
12.1	Datagrunnlag	76
12.2	Referansebygning og IDA ICE	77
12.3	Microsoft Excel og Monte Carlo-metoden	79
12.3.1	Statistisk fordeling og standardavvik	79
12.3.2	Monte Carlo metode 1 og 2	80
12.3.3	Sammenlagring	81
12.4	Videre utvikling	81
13	Konklusjon	83
14	Videre arbeid	84
	Referanser	85
	Vedlegg	90
A	Inputparametre i Occupancy Simulator	A1
B	Rapport for oppgavens referansebygning tatt fra IDA ICE	B1
C	Sammenligningsrapport for alle simuleringene med brukervariasjoner	C1

Figurer

1.1	Anslag av utviklingen av maksimalt effektuttak per år i Norge.	2
2.1	Målt spes. energibruk mot beregnet levert energi i kontorbygninger.	6
2.2	Fire hovedområder for ref.bygg etter DOE	7
3.1	Fordeling av samlet spesifikk energibruk i TEK.	13
4.1	Utvikling av batterikapasitet med begrensninger på sikringsstørrelse	18
4.2	Opp- og utladning av et batteri i sammenheng med effektprofiler.	19
5.1	Oversikt over brukernes interaksjon med en bygning.	20
5.2	Brukerprofiler fra TS 3031 med effektvariasjoner for kontorbygninger	21
5.3	Skjematisk oversikt over framgangsmåten til <i>Occupancy Simulator</i>	23
5.4	Brukerprofiler for antall personer i en kontorbygning på 2040 m ²	24
6.1	Generell metode for etablering av ref.bygninger	28
7.1	Topplast per husholdning for et økende antall aggregerte husholdninger	32
7.2	Illustrasjon av normalfordeling innenfor Monte Carlo	35
8.1	Plantegning av soneinndeling i referansebygningen	38
8.2	Skjerm bilde av referansebygning i IDA ICE.	39
8.3	Spesifikt energibehov per bygningsdel fra ulike sammenligningsgrunnlag	44
8.4	Samlet spesifikt energibehov fra ulike sammenligningsgrunnlag	45
9.1	Årlig varmebehov for en bygning på 2040 m ²	46
9.2	Temperaturavhengig spredningsplott	47
9.3	Brukerprofil for varmtvann	47
9.4	Varmebehov på kald og varm dag for referansebygning kontra ZEN Predictor	48
9.5	Varmebehov på kald dag for referansebygning kontra ZEN Predictor	48
9.6	Årlig elektrisitetsbehov for en bygning på 2040 m ²	49
9.7	Elektrisitetsbehov på en kald dag for referansebygning kontra ZEN Predictor.	50
9.8	Månedlig fordeling av energiposter i en bygning på 2040 m ²	51
9.9	Årsprofil av varmebehovet til referansebygningen.	52
9.10	Årsprofil av elektrisitetsbehovet til referansebygningen.	52

10.1	Tre stokastiske brukerprofiler for Landskap 1 en tilfeldig dag.	54
10.2	Stokastiske brukerprofiler for cellekontor, møterom, trafikk og spesialrom. . . .	54
10.3	Programmering av egendefinert brukerprofil og av/på lyskontroll.	55
10.4	Spesifikt energibehov for de ulike variasjonene med avvik for bevegelsesmønster.	57
10.5	Statistisk fordeling av simulerte effekter fra januar til juli.	58
10.6	Statistisk fordeling av simulerte effekter fra juli til desember.	58
10.7	Effekt med varians en typisk kald dag.	59
10.8	Effekt med varians en middels dag.	59
10.9	Effekt med varians en varm dag.	59
10.10	Eksempel på varmebehov for ulike driftsvariasjoner utenfor driftstid	60
10.11	Statistisk fordeling av elektriske effekter fra januar til juli	61
10.12	Elektrisk effekt med varians en typisk kald dag	61
10.13	Elektrisk effekt med varians en middels dag	61
10.14	Elektrisk effekt med varians en varm dag	62
10.15	Elektrisitetsbehov for nattesenking av temperatur kontra andre simuleringer .	62
10.16	Simulerte årsprofiler av referansebygning med variasjoner fra IDA ICE.	63
10.17	Simulerte dagsprofiler av referansebygning med variasjoner fra IDA ICE. . . .	64
10.18	20 årsprofiler med bruk av MC 1.	65
10.19	10 dagsprofiler med MC 1.	65
10.20	20 årsprofiler med bruk av MC 2.	65
10.21	10 dagsprofiler med MC 2.	65
10.22	Totalt aggregert varmebehov for 20 bygninger en tilfeldig dag.	66
10.23	Statistisk fordeling ved bruk av ulike MC-metoder.	67
10.24	20 årsprofiler med bruk av MC 3.	68
10.25	10 dagsprofiler med MC 3.	68
10.26	Beregning av sammenlagningsfaktor ved økende antall aggregerte bygninger. .	68
10.27	Varighetskurver for varmebehovet med de ulike MC-metodene.	69
10.28	Utvalg av 10 dagsprofiler fra MC 3 sammenlignet med referansebygning. . . .	70
10.29	Beregning av sammenlagningsfaktor for elektrisitet med ulike MC-metoder. . .	70
10.30	Varighetskurver for elektrisitetsbehovet med de ulike MC-metodene	71
11.1	Variasjon i topp effekt for 80 bygninger med økende antall aggregerte.	72
11.2	Gjennomsnittlig energibehov for referansebygninger og MC 3-profiler.	73
11.3	Variasjon i topp effekt for elektrisitet med økende antall aggregerte bygninger. .	73
11.4	Gjennomsnittlig energibehov for referansebygninger og MC 3-profiler.	74
12.1	Total brukerprofil etter TS 3031	77
12.2	Brukerprofil for møterom.	77

12.3	Totalt tilført luftmengde i kontorbygningen over et år.	78
12.4	Totalt tilført luftmengde i kontorbygningen en dag i januar.	78
12.5	Spredningsplott av forholdet mellom std.avvik og temperatur utenfor driftstid.	80
12.6	Spredningsplott av forholdet mellom std.avvik og temperatur i driftstid.	81

Tabeller

3.1	Komponentkrav til U-verdi etter TEK 17	10
3.2	Minstekrav til komponenter i NS 3701	11
3.3	Anbefalte inneklimateparametre for godt arbeidsmiljø	12
5.1	Variasjoner innenfor drift og bruk i ulike kontorbygninger i Norge	21
8.1	Sonefordeling per etasje i referansebygningen.	38
8.2	Skyggefaktorer for External blind(BRIS) hentet fra IDA ICE.	39
8.3	U-verdier fra TEK17, passivhusstandarden og referansebygningen	40
8.4	Verdier for til drift og bruk basert på NS 3701.	40
8.5	Nøkkelvordier fra energiforsyningen til referansebygningen.	41
8.6	Inngangsparametre for ventilasjonssystemet.	42
8.7	Radiatorkapasitet i hver sone av kontorbygningen.	42
8.8	Kontroll av krav for en kontorbygning på 2040 m ² i Trondheim.	45
10.1	Endrede parametre for variasjoner i referansebygningen.	56

Tekniske begreper og forkortelser

Aggregering	Slå sammen eller kombinere data
BIM	Building Information model- Digital modell av en bygning
BRA	Bruksareal- Bygningens innvendige areal
CAV	Constant airflow ventilation- Ventilasjon med konstant tilførsel av luftmengde
COP	Coefficient of performance- Forholdet mellom tilført elektrisitet og utvunnet energi/varme
Driftstid	Tiden hvor mennesker normalt befinner seg i bygninger, og/eller tekniske anlegg kjører
DUTs	Dimensjonerende utetemperatur- sommer
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning- Varmekilde, ventilasjonsanlegg, luftbehandling og kjøling
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy - Bygningssimuleringsprogram med fokus på energibruk og inneklime
Met/ Clo	Enhet for aktivitetsnivå/bekledning til mennesker
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied- Forventet antall personer som er misfornøyde med inneklime
Referansebygning	Bygninger som karakteriseres av- og representerer sin funksjonalitet og geografiske beliggenhet
Referansemodell	I denne oppgaven: Bygningsområde med et større antall bygninger av samme kategori, som karakteriseres av- og representerer sin funksjonalitet og geografiske beliggenhet
Sammenlagingsfaktor	Forholdet mellom det samtidige maksimale kravet fra en gruppe elektriske apparater/bygninger og summen av de individuelle maksimale kravene i samme periode

Samtidighet	Om topplasten for et apparat/bygning skjer på samme tidspunkt som gjennomsnittlig topplast
SFP	Specific fan power- Spesifikk vifteeffekt, forhold mellom elektrisk tilførsel og transportert luftmengde[kW/m ³ /s]
Spesifikk energi	Energi per kvadratmeter [kWh/m ²]
U-verdi	Varmegjennomgangs-koeffisient- Mål på isoleringsevnen til materialer og bygningsdeler [W/m ² K]
VAV	Variable airflow ventilation- Ventilasjon med variabel tilførsel av luftmengde
ZEB	Zero Emission Building- Nullutslippsbygning/ forskningssenter
ZEN	Zero Emission Neighbourhood- Nullutslippsnabolag/ forskningssenter

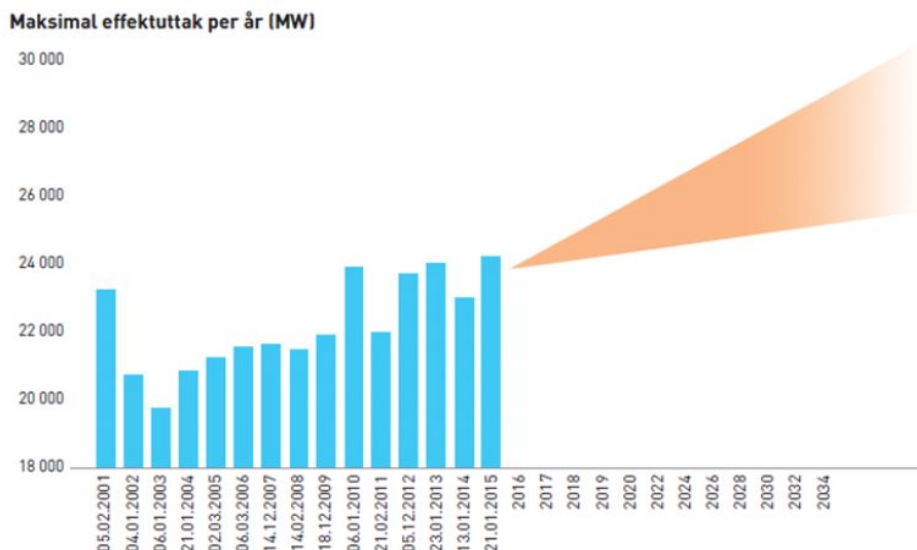
1. Innledning

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Klimakampen er en politisk sak som hele verden har til felles. Temaet engasjerer mange, og man hører stadig ordet klima i nyhetsbildet. Ungdommenes fredagsstreiker satt i gang av svenske Greta Thunberg, gjentakende politiske valgkamper, ulike naturkatastrofer eller internasjonale organisasjoner som jobber mot en løsning på klimaendringene er eksempler. Parisavtalen er et tiltak, der 195 stater har forpliktet seg til å gjennomføre utslippskutt, for å jobbe mot å begrense jordas temperaturøkning til $1,5^{\circ}\text{C}$ [1]. Det vil oppstå store ødeleggelser, dersom den gjennomsnittlige globale temperaturen øker med mer enn $1,5^{\circ}\text{C}$. Et av de foreslåtte tiltakene for å nå dette målet er at byene må bygges på en klimavennlig måte, noe som omfatter både infrastruktur og bygninger [2]. Energibruk i bygninger står i dag for minst en tredjedel av verdens energiforbruk [3], og her finnes det store forbedringspotensialer for å redusere energibruken og klimafotavtrykket.

Bygningsmassen i byer vil stadig øke, og det er dermed viktig å bygge energieffektive nybygg, samt rehabilitere gamle energislukende bygninger. Prosjektering av energieffektive bygninger har i dag utviklet seg til prosjektering av energieffektive områder og nabolag, for blant annet å utnytte energikilder enda bedre. For å forstå behovet i næringslivet er det innledet et samarbeid med Jens Tønnesen og Asplan Viak, som bekrefter utviklingen mot prosjektering av større områder og nabolag. Det er også kastet lys over et negativt økende effektbehov i samfunnet, som vil få mer og mer oppmerksomhet i fremtiden. For å imøtekomme disse retningene samtidig, er det et behov for å kunne estimere mer pålitelige energi- og effektprofiler for bygninger på områdenivå.

Det økende effektbehovet har bakgrunn i at Norge går mot et mer elektrifisert samfunn, på grunn av krav om lavere CO_2 -utslipp, lave elektrisitetspriser og en stor andel fornybare energikilder basert på elektrisitet, som vann- og vindkraft. Elektrisitetsforbruket varierer avhengig av tid på døgnet, temperaturer og menneskelige aktiviteter, og fører til høye effekttopper, gjerne på kalde vintermorgener. Effektforbruket defineres som elektrisitetsforbruket i et enkelt øyeblikk, og har hatt en betydelig økning siden 1990. Elektrifisering av transportsektoren kan ha forårsaket økningen, samt flere effektkrevede apparater i husholdninger. Figur 1.1 viser en mulig utvikling av det maksimale effektuttaket for elektrisitetsforbruket i Norge, publisert av NVE. [4]



Figur 1.1: Anslag av utviklingen av maksimalt effektuttak per år [4].

For å dempe denne utviklingen kan energikilder dimensjoneres for å ta ut mindre effekt. En mer nøyaktig dimensjonering av energikilder kan oppnås ved utforskning av samtidighet mellom bygninger, gjennom pålitelige energi- og effektprofiler av nye bygningsområder. En lavere samtidighet vil si at de ulike effektene spres på forskjellige tidspunkt, slik at man unngår høye summerte effekttopper. Forholdet mellom summert samtidig effekt i flere bygninger og summen av individuelle maksimale effekter kalles sammenlagningsfaktor, og ligger mellom 0 og 1. For å påvirke til en lavere sammenlagningsfaktor kan for eksempel elbilene lades om natten når det er et lavt elektrisitetsbehov. [4]

Forskningsprosjektet ExPOSE utvikler metoder for langsiktig energiplanlegging av bymiljø, hvor det skal forskes på hvordan aggregert energibehov og klimagassutslipp over livsløpet blir påvirket av langsiktige strukturforandringer. Strukturforandringene kommer i takt med utviklingen mot et energieffektivt samfunn, med blant annet bruk av solfangere, varmelagring, solceller, fjernvarme, samt NZEB (Nearly Zero Emission Building) og plussusteknologier. Medveileder for denne oppgaven og PhD-student, Yiyu Ding, jobber med ExPOSE og har tatt utgangspunkt i bygningsmassen i Trondheim.

Med bakgrunn i samarbeidet med Jens Tønnesen og Yiyu Ding vil Trondheim være et godt utgangspunkt for denne masteroppgaven. Forskningsprosjektet ExPOSE ser på en overordnet langsiktig påvirkning på et helt bymiljø som blir tilført nye bygninger og teknologier, mens denne masteroppgaven vil avdekke energi- og effektprofilene til et område før det blir bygd. På denne måten kan man optimere og redusere energi- og effektbruken før området er etablert og pengene er brukt, noe som vil være et godt hjelpemiddel for konsulenter i planlegging av området.

1.2 Problembeskrivelse og mål for oppgaven

Målet med oppgaven er å utvikle en metode som kan hjelpe konsulenter i planleggingen av større bygningsområder. I en prosjekteringsfase med mange bygninger er det vanskelig å anslå energi- og effektbruk, og ved samtaler med kunden kan derfor påliteligheten i prosjektet svekkes på grunn av generelle eller usikre verdier. Utfordringen med å anslå energi- og effektbruk for områder er forårsaket av at energi- og effekttoppene inntreffer på forskjellige tidspunkt i de ulike bygningene. Ved å benytte simuleringsdata for en typisk kontorbygning skal det defineres en fremgangsmåte for å aggregere energi- og effektbehovene, med hensyn til samtidighet og variasjoner i drift og bruk av en kontorbygning.

Det er definert punkter for utførelse av oppgaven, som har blitt noe justert underveis på grunnlag av nye tekniske spørsmål som har dukket opp i prosessen.

Kandidaten skal:

- Lage og optimere en referansebygning for den typiske kontorbygningen i IDA ICE, med bakgrunn i forskrifter og standarder.
- Studere og vurdere brukerprofiler for ulike brukere, lys, utstyr og varmtvann.
- Produsere flere profiler for varme- og elektrisitetsbehov i kontorbygningen, på bakgrunn av variasjoner i usikre parametere.
- Oppsummere simuleringsresultater gjennom totalt årlig energibruk per energibærer, med timesprofiler, varighetskurver, og spredningsplott med hensyn til utetemperatur.
- Utføre en analyse i Excel hvor den typiske variasjonen defineres og et standardavvik opprettes.
- Finne en metode for å produsere et mangfold av kontorbygninger som representerer et bygningsområde.
- Organisere og presentere de endelige statistiske resultatene, der bakgrunnen for ulike profiler og usikkerheter er forklart.

1.3 Struktur

Som oppgaveteksten definerer er målet med oppgaven å utvikle en metode, som kan anvendes for en bedre og mer treffsikker estimering av effekt- og energibehov på områdenivå. En referansebygning blir simulert i IDA ICE, med utgangspunkt i standarder, forskrifter og værddata for Trondheim. Videre aggregering mot et større område blir utført i Microsoft Excel ved en Monte Carlo-simulering, og den totale fremgangsmåten vil kalles en referansemodell.

Delmål som blir gjennomført for å nå hovedmålet er et litteraturstudium, som blir presentert i kapitler 2-7. Kapitlene går nærmere inn på energibruk i bygninger, tekniske krav og standarder, tekniske systemer i bygg, drift og bruk av en kontorbygning, samt energiplanlegging. Energiplanleggingen er delt inn i to kapitler, der kapittel 6 tar for seg energiplanleggingen av en enkelt bygning, mens kapittel 7 konsenterer seg om planleggingen av et helt bygningsområde. Det ses nærmere på prosessen bak en designfase, i tillegg til alternative fremgangsmåter og programvarer.

Etter dette blir metoden for å etablere en referansebygning beskrevet i kapittel 8, hvor blant annet fremgangsmåten i IDA ICE blir presentert. I kapittel 9 vil resultatene fra referansebygningen bli lagt frem og diskutert lett.

Den ferdige referansebygningen av et kontor blir brukt videre til å finne forskjeller i drift og bruk, og til å etablere et standardavvik for energi- og effektbehov. Dette blir beskrevet i kapittel 10, sammen med metoden som blir brukt i Microsoft Excel og Monte Carlo-simuleringen. Her blir ulike fremgangsmåter diskutert, før det blir konkludert med det mest egnede alternativet.

Resultatene for referansemodellen blir presentert i kapittel 11, med en oppsummering av metoden tilslutt. Påfølgende kommer en overordnet diskusjon i kapittel 12, før arbeidet konkluderes og det legges frem ideer for videre arbeid i kapittel 13 og 14.

1.4 Oppgavens begrensninger

Inndata til referansebygningen er i hovedsak basert på teoretiske verdier fra standarder, uten tilgang på driftsopplysninger og måledata til kalibrering fra reelle kontorbygninger. Energibehov kan dermed vike fra virkelige kontorbygninger.

På grunn av begrenset tidsperspektiv tilfredsstillende ikke antall simulerte driftsvariasjoner behovet for pålitelig normalfordeling og standardavvik av varme- og elektrisitetsbehov. Det antas derimot at det er tilstrekkelig for å vurdere forskjellige metoder for aggregering av energi- og effektprofiler.

2. Fremtidige kontorbygninger

For å finne ut hvordan fremtidige byggeprosjekter vil se ut, er eksempler på nasjonal forskning en god indikator. Zero Emission Buildings (ZEB) ble etablert som forskningsområde i 2009 og jobber mot å eliminere utslipp av drivhusgasser, med fokus på både forskning, innovasjon og implementering av energieffektive bygninger. Åtte år senere, i 2017, ble konseptet videreutviklet til Zero Emission Neighbourhoods in Smart Cities (FME ZEN) som har fokus på områdeutvikling og nullutslipps nabolag. Ved å utvikle konkurransedyktige løsninger og produkter, vil ZEB og FME ZEN utfordre markedet og øke interessen for bygninger og nabolag, som har nullutslipp av klimagasser under produksjon, drift og riving. [5, 6]

I veien mot et mer energieffektivt samfunn er det viktig å forstå teorien bak energibehovet til en bygning og hva som ligger i begrepet energieffektivisering. Dette er grunnmuren til nullutslippsbygningene som ble beskrevet i forrige avsnitt og viktige brikker i utviklingen av nye byggeprosjekter. I henhold til problemstillingen vil det også bli beskrevet hvilke tiltak som er gjort i Trondheim, og hvilket utgangspunkt fremtidige bygninger har i denne byen.

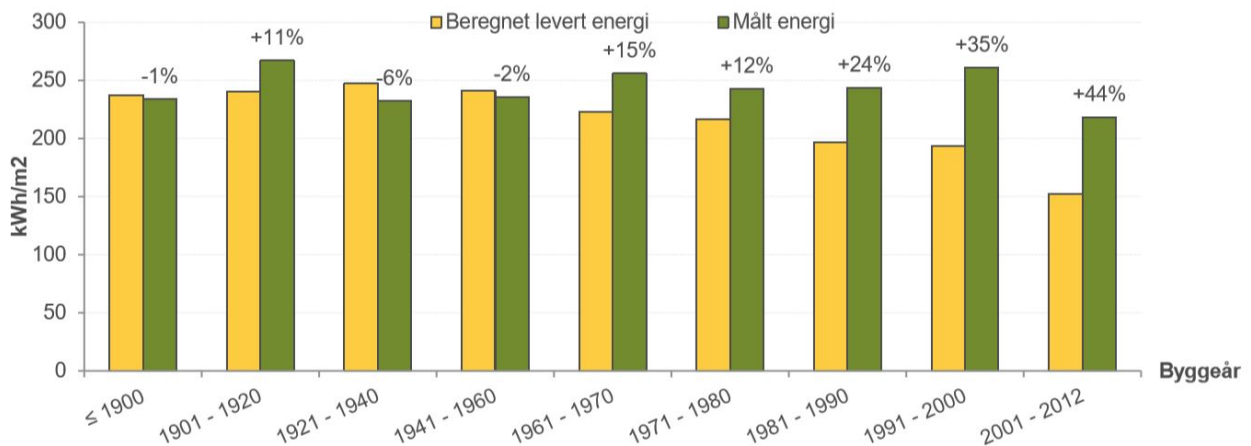
2.1 Energibruk

Påvirkningen av energibruken i bygninger kan i hovedsak deles opp i seks ulike faktorer;

1. Lokalt klima
2. Bygningskropp
3. Teknisk utstyr og energisystemer
4. Drift og vedlikehold
5. Bruksmønstre
6. Krav til inneklime

De tre første punktene er under kategorien tekniske og fysiske faktorer, og har fått størst oppmerksomhet de siste tiårene. Det har skjedd en stor utvikling av bygninger, blant annet for passivhus og plusshus. Kjentegn for passivhus er en kompakt og tett bygningskropp, som utnytter seg av passive løsninger, som varmetilskudd fra mennesker og tekniske installasjoner. Et plusshus produserer i tillegg sin egen fornybare energi hvor produksjonen tilsvarer forbruket av energi i løpet av bygningens livssyklus, fra oppføring til drift og anvendelse. [7]

Drift og vedlikehold, bruksmønster og krav til inneklimate er påvirket av menneskelige faktorer. Det viser seg imidlertid at disse har minst like stor påvirkning på den totale energibruken som punkt 1-3. Figur 2.1 som er hentet fra NVE sin rapport om energibruk i kontorbygninger viser hvordan den målte energibruken er sammenlignet med den beregnede. Figuren viser at forskjellen mellom beregnet og målt energibruk har økt betydelig de siste årene. Bruksmønster, innstillinger for inneklimate i tillegg til drift og vedlikehold kan være faktorer som forårsaker differansen. Med strengere krav til bygningskroppen har drift og bruk fått en større påvirkning på den totale energibruken, og dette er faktorer som er vanskeligere å forutsi. Drift og bruk skal utforskes videre i hoveddelen av masteroppgaven. Andre faktorer som også kan spille inn er målefeil og at verdiene i byggt teknisk forskrift (TEK) utelater energibruk til kjøling. [8]



Kilde: Energimerkeordningen (2012), THEMA Consulting Group

Figur 2.1: Målt spesifikk energibruk mot beregnet energibruk per byggeperiode i kontorbygninger [8].

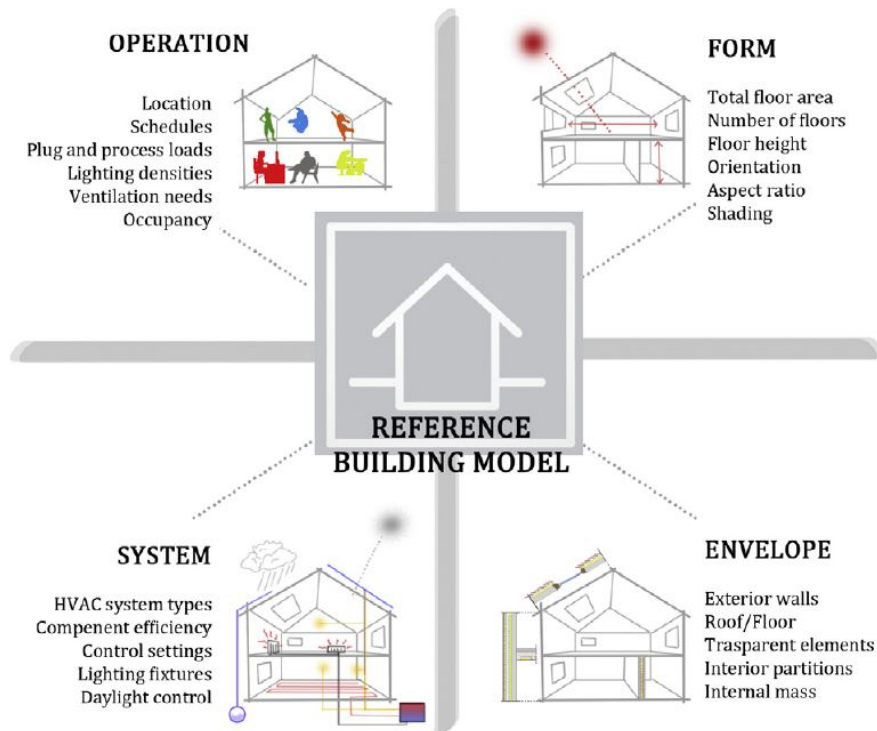
For å forenkle prosessen med å etablere en referansebygning senere i rapporten blir faktorene slått sammen og delt inn i fire hovedpunkter. Disse fire punktene blir brukt og beskrevet av Department of Energy (DOE) of United States, som blant annet har definert referansebygninger for 16 bygningstyper, over 16 lokasjoner, i 3 forskjellige byggeperioder. Hovedpunktene er illustrert i figur 2.2 og er hentet fra studien "Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application" av Corngati et al [9].

Bygningsgeometri - Innebærer hvilken bygningskategori modellen representerer, noe som i denne oppgaven tilsvarer en kontorbygning. Informasjon om størrelse og generell planløsning eller sone-inndeling, kommer også inn under denne kategorien.

Bygningskropp - Informasjon om den overordnede konstruksjonen og hvilke materialer som benyttes. Dette innebærer alle termofysiske egenskaper som U-verdier, kuldebroer, varmelagringsegenskaper o.l.

Tekniske systemer - Inneholder varme- og kjølesystemer, ventilasjonssystem, og energiproduksjonssystemene.

Drift og bruk - Informasjon om tilstedeværelse i den aktuelle bygningskategorien, samt bruksmønster for de tekniske installasjonene og utstyret.



Figur 2.2: Et referansebygg er definert ut i fra disse fire hovedområdene ifølge DOE [9].

Bygningsgeometrien blir satt etter den typiske kontorbygningen og tar utgangspunkt i gjennomsnittlige analyser av eksisterende kontorbygninger. Bygningskroppen følger også faste verdier fra forskrifter og standarder, som blir beskrevet i kapittel 3. De to siste punktene, Tekniske systemer og Drift og bruk, er mer komplekse og vil derfor analyseres nærmere i kapittel 4 og 5.

2.2 Energieffektivisering

Effektivitet kan sikre økonomisk vekst, redusere klimagassutslipp og forbedre energisikkerheten. Den rette effektiviseringspolitikken kan i seg selv redusere 40% av CO₂-utslippene verden trenger for å nå klimamålene, uttrykker daglig leder Fatih Birol i International Energy Agency [10].

I disse ordene ligger effektivisering av transport og industrinæringen, samt energibruken i bygninger. Bakgrunnen for energieffektivisering er å stadig oppnå [11];

1. Best mulig bygningsmessig standard
2. Bedre ytelse i tekniske installasjoner
3. Mer kunnskap og endringer innenfor drift og bruk av bygninger

Enova SF er et norsk statsforetak, som ble stiftet i 2001, for å fremme en mer miljøvennlig energibruk og energiforsyning i Norge. Enova er idag underlagt Klima- og Miljødepartementet og har fra 2016 har vært sentral i utviklingen av lavutslippssamfunnet. Dette innebærer en sterk satsing på reduksjon av klimagassutslipp og støtte til teknologiutvikling. [12] I 2018 etablerte Enova to støtteprogrammer innenfor bygg og eiendom, som utfordrer aktører til å gå utover gjeldene krav i teknisk forskrift og teste ut nye teknologier i nybygg. [13]

Ulike satsingsområder som Enova engasjerer seg i, er mye basert på kunnskap og tidligere forskning, som blant annet Enovas potensial og barrierestudie fra 2012. Her kartlegges potensialer og barrierer for energieffektivisering i den norske bygningsmassen. Rapporten skiller mellom teoretisk, teknisk, økonomisk og reelt potensial. Teoretisk potensial er den energibesparelsen det er mulig å oppnå uten å ta hensyn til hva som er teknisk og økonomisk mulig. Det reelle potensialet tar hensyn til disse faktorene, og er i tillegg avhengig av reguleringer og faktorer på individ-nivå. [11]

For å finne det reelle potensialet må barrierestudien analyseres, der en barriere defineres som *et forhold ved eller rundt en beslutningstaker som hindrer gjennomføring av en ønsket type atferd* [11]. Økonomisk lønnsomhet er den største barrieren med 65% nedgang i potensial. Fra økonomisk til reelt potensial kan barrierer som villighet til oppgradering, og liten oppmerksomhet og kunnskap rundt energibruk, spille en rolle. Ved bevisstgjøring rundt energi- og effektprofiler kan dette minske de økonomiske barrierene i form av riktig dimensjonerte tekniske anlegg, samt bidra til kunnskap om effektiv energibruk. [11]

2.2.1 Tiltak i Trondheim

18.mai 2017 vedtok bystyret en ny klimaplan for Trondheim [14]. Med en visjon om å være en internasjonal pilot for utvikling av gode klima- og miljøløsninger, ble det satt opp en kommunedelplan, et handlingsprogram og en miljøstrategi for bygninger.

Kommunedelplanen innenfor bygg og anlegg har satt to konkrete delmål [14]:

1. Trondheim vil ha full utfasing av bruk av fyringsolje i boliger og næringsbygg innen 2020
2. Det skal etableres forbilledlige områder for energi- og klimavennlige bygg og bydeler, også nullutslippsområder, i Trondheim.

For å nå delmålene skal det først og fremst etableres et samarbeidsforum kalt *Klimapakke for by*

og bygg. Her skal det legges til rette for at nye, og eksisterende, klimavennlige virkemidler når ut til befolkningen, som for eksempel støtteordninger fra Enova ved investering i fornybare løsninger. Innovasjon og forskning skal fremmes ved å sette sammen byggnæringen, byggherrer og forskningsmiljøer i et nettverk, og utvikling av løsninger for energieffektivisering i eksisterende bygningsmasse skal prioriteres. Her er energioppfølging samt behovsstyring av ventilasjon, varme og belysning viktige tiltak. [14]

Det andre delmålet bekrefter behovet for en metodikk som kan hjelpe konsulenter i planleggingen av større bygningsområder, i og med at dette er et satsingsområde i Trondheim kommune.

3. Energikrav og standarder

Dette kapitlet beskriver lovverket for oppføring av kontorbygninger. Den byggt tekniske forskriften skal sørge for at tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi blir oppfylt, samt at dette blir utført med god visuell kvalitet og universell utforming. Ulike standarder er et forslag på hvordan kravene i byggt teknisk forskrift kan oppfylles, men er ikke lovpålagt.

Først presenteres de aktuelle forskriftene og standardene som er brukt i denne masteroppgaven. Deretter legges det frem en oversikt over den historiske utviklingen og forventet fremtidig utvikling.

3.1 Byggt teknisk forskrift fra 2017

Byggt teknisk forskrift 2017 (TEK17) trådte i kraft 1.juli 2017 og erstatter TEK10. Den reviderte versjonen av TEK10 blir sett på som en overgang til TEK17 og de fleste endringene fra TEK 10 til TEK 17 trådte derfor allerede i kraft fra 1. januar 2016. Tabell 3.1 viser mistekravene i TEK17 og forslag på tiltak for å oppfylle rammekravet på 115 kWh/m² for kontorbygninger, vist nederst i tabellen. Rammekravet oppfylles ikke nødvendigvis ved å følge mistekravene, og forskriften presenterer derfor forslag til tiltak. [15, 16]

Tabell 3.1: Komponentkrav til U-verdi etter TEK 17 [15]

Gjennomsnittlige verdier per bygningsdel	Enhet	Minstekrav §14-3	Tiltak fra §14-2
U-verdi yttervegg	W/m ² K	< 0,22	< 0,18
U-verdi tak	W/m ² K	< 0,18	<0,13
Ekvivalent U-verdi gulv	W/m ² K	< 0,18	< 0,10
U-verdi vinduer og dører	W/m ² K	< 1,20	< 0,80
Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA	%	-	25
Temp.virkningsgrad for varmegjenvinner i vent.anlegg	%	-	> 80
Spes. vifteeffekt i vent.-anlegg (SFP)	kW/m ³ /s	-	< 1,50
Luftlekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell	h ⁻¹	< 1,50	0,60
Normalisert kuldebroverdi	W/m ² K	-	0,07
Totalt netto energibehov for kontorbygg	kWh/m ²	115	

Andre endringer fra TEK10 til TEK17 som kan påvirke kontorbygninger er forbudet mot å

installere varmeløsninger for fossilt brensel, påbud om energimålere for romoppvarming, ventilasjon og tappevann for næringsbygg, og krav om at energibudsjett skal beregnes med reelle verdier for den konkrete bygningen [16].

3.2 Byggteknisk Spesifikasjon 3031 og Passivhusstandard for yrkesbygninger

NS/TS 3031 er en teknisk spesifikasjon for *Bygningers energiytelse- Beregning av energibehov og energiforsyning* [17]. Med bakgrunn i TEK17 inneholder denne spesifikasjonen forslag til hvordan man kan beregne bygningers energibehov, behov for levert energi og mengde eksport av energi til energinettet. Ved å følge denne spesifikasjonen oppfylles kravene i byggteknisk forskrift og er et mer detaljert alternativ til energiltakene i tabell 3.1.

NS 3701:2012, *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger innenfor yrkesbygg* [18] ble fastsatt i september 2012. Denne standarden bygger på energibehovsberegninger etter NS 3031 og stiller krav til yrkesbygninger som kan defineres som passivhus og lavenergibygninger i norsk klima. Den kan også benyttes til å stille krav til materialer og utførelse av byggeprosessen i passivhus eller lavenergihus. Standardens minstekrav til enkelte bygningskomponenter er presentert i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Minstekrav til komponenter i NS3701 [18]

Egenskap	Passivhus
U-verdi vindu og dør [W/m^2]	< 0,80
Normaliserte kuldebroverdier [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,03
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinnere [%]	80
SFP-faktor ventilasjonsanlegg [$\text{kW}/\text{m}^3/\text{s}$]	1,5
Lekkasjetall ved 50 Pa [h^{-1}]	0,60

Standarden inneholder også definisjoner, krav til varmetap, oppvarmingsbehov, kjølebehov, energiforsyning og energibehov til belysning [18].

3.3 Norsk Standard for inneklimate, EN 15251

NS-EN 15251:2007+NA:2014 er en europeisk standard som ble fastsatt som norsk standard i 2007, med et nasjonalt tillegg som kom i 2014. Standarden inneholder inneklimateparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk [19]. Standarden gir eksempler og råd på hvordan et godt inne-

klima kan kombineres med redusert energibruk. Parametre for nevnte områder er systematisert sammen med forskjellige klimaklasser og nivåer for godt inneklima. Nyttig informasjon med tanke på å sikre godt inneklima for en kontorbygning er oppsummert i tabell 3.3.

Tabellen tar utgangspunkt i tre ulike kategorier for hver verdi, hvor kategori II er normalt forventningsnivå, som bør brukes i både nye og rehabiliterte bygninger. Kategori I ligger på et høyere nivå for mer sensitive mennesker, mens kategori III er akseptabelt nivå, som kan brukes i eksisterende bygninger.

Tabell 3.3: Anbefalte inneklimaparametre for godt arbeidsmiljø

Termisk tilstand for hele bygningen		
Kategori	PPD [%]	Forventet middelvurdering
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
Operativ temperatur		
Kategori	Minimum for kontorlokale [°C]	Maksimum for kontorlokale [°C]
I	21,0	25,5
II	20,0	26,0
III	19,0	27,0
Luftmengder for yrkesbygninger		
Kategori	Per person [l/s·person]	Utslipp fra lavt forurensende bygg [l/s·m ²]
I	10	1
II	7	0,7
III	4	0,4
CO ₂ -konsentrasjoner		
Kategori	Utendørs CO ₂ -konsentrasjon + følgende verdi [PPM]	
I	350	
II	500	
III	800	

Den termiske tilstanden til en bygning defineres ut i fra forventet middelvurdering (PMV) og forventet prosentandel av misfornøyde (PPD). Denne indeksen kan brukes direkte som dimensjoneringskriterium, der det blir tatt hensyn til den generelle følelsen av komfort, som både temperaturer og ventilasjonsnivå.

3.4 Historisk og fremtidig utvikling av lovkrav

Den første utgaven av byggt teknisk forskrift kom i 1949, og den historiske utviklingen av forskriften gjenspeiler endringene av den spesifikke energibruken i kontorbygninger.

Energibruk i kontorbygninger er et produkt av mange faktorer gjennom livssyklusen. Valg av bygningskropp og tekniske løsninger er først og fremst påvirket av nasjonale lovverk i tillegg til klimatiske forhold. Økonomi, teknologisk utvikling og ulike strukturer og aktører innenfor byggebransjen vil også være viktige påvirkningsfaktorer. Forskriftskravene har blitt strengere samtidig som teknologien har blitt bedre, som tilsier at energibruken har gått ned ned siste tiårene. Figur 3.1 viser den historiske utviklingen av spesifikk energibruk i kontorbygninger basert på beregnede verdier, og fordelingen av denne på ulike forbruksposter.

Aktuell TEK	Eldre	49	69	87	97	07	10	Passivhus
Romoppvarming	189	173	100	54	43	30	29	8
Oppvarming av tappevann	5	5	5	5	5	5	5	5
Ventilasjonsvarme (varmebatteri)	-	-	63	43	35	29	11	6
Vifter (ventilasjon)	-	10	23	43	38	22	18	8
Pumper	1	1	3	3	3	3	3	1
Belysning	47	47	47	47	25	25	20	16
Teknisk utstyr	35	35	35	35	35	35	35	22
Romkjøling	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventilasjonskjøling (kjølebatteri)	-	-	11	21	21	19	10	9
Total (kWh/m²)	277	271	287	251	204	167	130	75

Kilde: Multiconsult m.fl. (2012) og COWI (for passivhus)

Figur 3.1: Fordeling av samlet spesifikk energibruk i TEK [20].

For å oppsummere har det vært en jevn forbedring av energikravene fra de ble etablert fram til i dag, med den kraftigste forbedringen fra TEK 69 til TEK 87. Forbedringen mellom disse revisjonene kan forklares med det sterke fokuset på industrilandenes energiforbruk på 70-tallet på grunn av usikkerheten rundt oljen, og derav en økt bevissthet rundt bygningers energiforbruk. [20]

Oversikten i figur 3.1 viser også beregnede verdier innen passivhusstandarden, som inneholder store forbedringer på alle forbrukspostene. Det forventes at nye fremtidige kontorbygninger

nærmer seg denne standarden og samtidig produserer egen energi. Det forventes også at teknologien stadig blir mer effektiv innenfor både ventilasjon, belysning og teknisk utstyr, som dermed fører til enda strengere krav og forskrifter. [8]

Det ble innført et klimaforlik mellom partiene i Stortinget i 2008 og 2012. Delmålene som berørte byggesektoren var å [21];

- Gjennomføre en klima- og teknologisatsing finansiert gjennom avkastningen fra et nytt fond for klima, fornybar energi og energiomlegging.
- Utfase fyring med fossil olje.
- Skjerpe energikrav i byggsektoren.

29.06.2018 ble det vedtatt et forbud mot bruk av mineralolje til oppvarming av boliger fra og med 2020 [22]. Dette skal minske CO₂-utslippene i Norge, og det vises tegn til en fremtidig satsing på fornybar energi, både i industrien, trafikken og i bygningssektoren.

I forslaget til statbudsjett i 2016, ble det imidlertid ikke satt av nok penger til å følge dette forliket, og det kan se ut til at det blir vanskelig å nå målene som er satt til 2020 [23, 24].

I 2010 trådte energimerkeordningen i kraft og innebærer at alle yrkesbygninger over 1000 m², i tillegg til bygninger som selges eller leies ut, må ha en energiattest. Attesten består av en energikarakter og en oppvarmingskarakter, med et mål om å øke bevisstheten rundt energibruk og energieffektive løsninger. 7. februar 2019 inviterte Olje- og energidepartementet sammen med Enova til åpent møte for å videreutvikle ordningen [25]. Her ble det lagt frem et forslag om at effektbehovet også skal påvirke energikarakteren, med tanke på utviklingen av energisystemet, som blir mer og mer avhengig av elektrisitet [26]. Påvirkningen effektbehovet har på energisystemet blir diskutert videre i neste kapittel.

4. Tekniske systemer og elektrisitetsforbruk i kontorbygninger

Dette kapittelet vil gå nærmere inn på de ulike energiforsyningsteknologiene, som ofte blir brukt i nåtidens- og fremtidens miljørettede kontorbygninger. Videre blir det gitt et innblikk i rør- og ventilasjonssystemene i bygninger, før det blir forklart hvorfor det er viktig med nøyaktige estimat av energi- og effektprofiler.

4.1 Energiforsyning

I 2017 kom ZEB Centre med en bok som presenterer ni ulike ZEB-bygninger, og teknologien og løsningene bak disse [27]. ZEB beskrives som fremtidens bygninger, og er kjent for å benytte de mest energieffektive løsningene. De representerte tekniske løsningene innenfor varme- og elektrisitetsbehov er i sju av de ni prosjektene en kombinasjon av solceller og varmpumper, hvor fjernvarme eller direkte elektrisitet fungerer som toppplast. Et studie fra Enova av passivhus/lavenergibygninger viser også at hovedandelen på 86% benytter termisk energi/elektrisitet og/eller fjernvarme som energibærere. [28] Teknologien bak disse energikildene er beskrevet nærmere i de neste kapitlene.

4.1.1 Solenergi

Solenergi kan utnyttes gjennom solceller og solfangere. Solceller omgjør solenergien til elektrisitet, mens solfangere varmer opp vann med energi fra solvarme. Solfangere blir først og fremst benyttet i prosjekter med stort varmtvannsbehov, og er derfor ikke like vanlig i kontorbygninger.

Til tross for Norges nordlige beliggenhet ligger det et teoretisk energipotensial på totalt 800-1000 kWh/m² fra solstråling, med en reduksjon for ulike vinkler og orienteringer. Et eksempel fra Oslo gir best utnyttelse av solenergien mot sør, med en vinkel på 30-60° fra vertikalen.

Mengde elektrisitet som kan produseres av en solcelle er proporsjonal med solintensiteten, men kan synke med økende temperatur i cellen [27]. Effektiviteten på solceller anno 2019 ligger i hovedsak mellom 14-25 %, men det er kontinuerlig forskning innenfor området. Silisium benyttes i 99 % av dagens solceller, og den teoretisk maksimale virkningsgraden for silisium ligger på 30 %. Ved å kombinere to lag med ulike grunnstoffer er det teoretisk mulig å kunne utnytte en større andel av lysspekteret fra sola. Dermed vil det være mulig å overstige 30 % effektivitet. [29]

4.1.2 Termiske energibærere

Termisk energi kan for eksempel hentes ut fra luft, vann eller fra bakken, ved hjelp av en varmepumpe. Varmepumpen henter varme fra omgivelsene og øker temperaturen ved hjelp av et arbeidsmedium i et lukket(eller åpent) system, trykkforskjeller og litt elektrisitet til kompressoren. Ved å reversere denne prosessen kan også varmepumper brukes til kjøling.

Hvilken type varmepumpe som blir valgt avhenger av omgivelsene. Både grunnfjell, sjøvann og luft er vanlige varmekilder. For større anlegg, som i kontorbygninger, er grunnfjell eller sjøvann å foretrekke, da effektiviteten er bedre.

En varmepumpe er en relativt stor investering, men billig i drift og blir ofte brukt som grunnlast i et mer komplekst varmesystem. Ved å installere en billigere topplast, kan en varmepumpe dimensjoneres til en svært gunstig COP, samtidig som investeringen reduseres. COP vil si forholdet mellom tilført elektrisitet til kompressoren og utvunnet energi. Kombinert med solceller, som dekker elektrisiteten som trengs, er dette et svært miljøvennlig alternativ. [27]

4.1.3 Fjernvarme

Fjernvarme er gjerne produsert på et større anlegg utenfor eiendommen. Vann blir varmet opp ved forbrenning av for eksempel avfall, biomasse, spillvarme, olje og/eller gass, og ført til et område gjennom rør i bakken. Dette vil si at klimagassregnskapet må beregnes ut i fra fjernvarmeanlegget og forbrenningsmaterialene. Fjernvarmeanleggene i Norge benytter idag gjennomsnittlig 4,7 % direkte fossilt drivstoff [30], som dermed vil øke andelen CO₂-utslipp i tilknytning til bygningen. Fjernvarme kam likevel et miljøvennlig alternativ da den største varmeandelen er produsert av fornybart drivstoff, og CO₂-utslippet varierer i stor grad fra anlegg til anlegg. [27]

Tall fra Statistisk Sentralbyrå fra 2017 [30] viser at tjenesteytende næringer, som blant annet kontorbygninger, mottar 60 % av den produserte fjernvarmen i Norge, som tilsvarer 3300 GWh med energi. Fjernvarme blir gjerne brukt som grunnlast på grunn av den lave driftsprisen, som konkurrerer med elektrisitetspriser. I nyere og energieffektive bygninger er fjernvarme også brukt som topplast, da det som regel allerede er installert et vannbårent system, som gjør den ekstra investeringen lav. Noen kommuner opererer også med en tilkoblingsplikt, der en mer miljøvennlig løsning må dokumenteres for å få unntak fra regelen. Det er imidlertid valgfritt å benytte seg av fjernvarmen eller ikke [31].

4.2 Rør- og ventilasjonssystem

Varmen og elektrisiteten som blir produsert av de ulike energiforsyningsteknologiene blir tilført bygningen gjennom et distribusjonssystem. Energien blir fraktet gjennom rør og ledninger,

ved hjelp av vann, luft eller elektrisitet. Konveksjon, konduksjon eller stråling vil deretter varme opp eller kjøle ned bygningen med varmevekslere i blant annet radiatorer, varmeelement, varmepumper eller i ventilasjonen.

Nyere kontorbygninger er utstyrt med en godt isolert bygningskropp, og det trengs derfor ikke varmekilder under vinduer for å hindre kald trekk lenger. Dette medfører en enklere distribusjon inne i bygningen, da det ikke nødvendigvis trengs en varmekilde inne i hvert rom. Alternativer som oppvarming gjennom luft eller vannbaserte lav-temperatur-radiatorer er dermed blitt mer populært. Dette reduserer investeringskostnadene, varmetapet, klimagassutslippet, behovet for antall rør, rørareal og antall varmevekslere. [27]

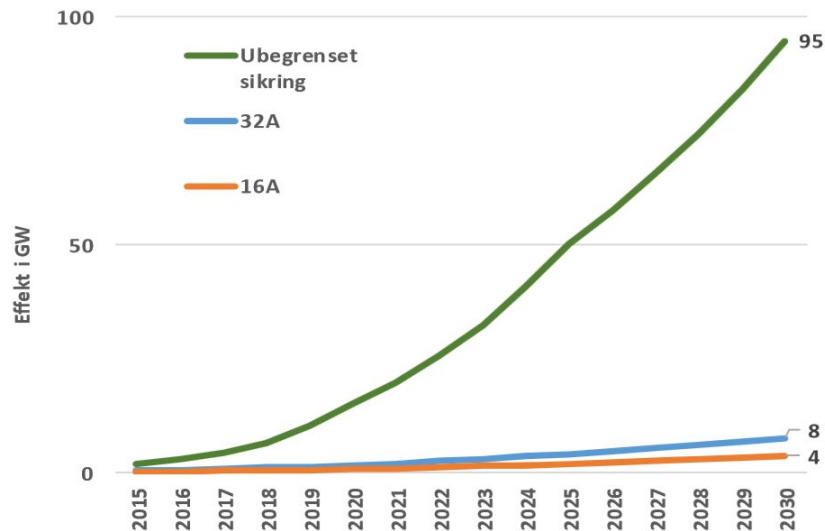
4.3 Viktigheten av nøyaktig estimat av energi- og effektprofil

Energi- og effektprofiler brukes aktivt i dimensjoneringen av de tekniske systemene som er forklart ovenfor. For å kunne anslå størrelsen på varmekildene og distribusjonsnett må en vite omtrentlig energibehov. Dimensjonene blir som regel planlagt etter forventet topplast, slik at de ulike komponentene kan håndtere den maksimale effekten [32]. De tekniske anleggene blir ofte overdimensjonert på grunn av unøyaktige beregningsmetoder, samt at det lenge har vært vanlig å legge på litt ekstra effekt ved dimensjonering, for å være på den sikre siden. En nøyaktig estimering av det totale behovet vil blant annet føre til mindre belastning på distribusjonsnett. En annen bieffekt av nøyaktige energi- og effektprofiler er troverdighet ovenfor byggeieren ved å legge fram realistiske verdier allerede i designfasen. Det gir god kommunikasjon og kunnskaps-overføring, som forklares nærmere i kapittel 6.4.

Større bedrifter deler som oftest elektrisitetskostnadene inn i to ledd, energi og effekt. Dette innebærer en fast kostnad for brukt toppeffekt hver måned. NVE har foreslått at dette også skal videreføres til boliger og mindre bygninger, og det har blitt større oppmerksomhet rundt effekt-leddet i elektrisitetsproduksjonen [33]. Dette understreker viktigheten av å analysere energibehovet, og mulighetene for å redusere toppeffekten.

I 2017 kom NVE med en rapport om hvordan *Batterier i bygg kan få betydning for det norske kraftsystemet* [34]. Kraftnettet blir mer og mer belastet, og utbygginger må til for å dekke effektbehovet. En betydelig andel av den norske befolkningen vil trolig ha elbil innen 2030, og med en teknologi som tillater overføring av strøm både inn og ut av batteriene, kan dette bidra til å avlaste kraftnettet og redusere effektbehovet med opp til 33 %. I dette anslaget er det tatt i betraktning at bruk av batterier i størst grad kommer i kombinasjon med innkjøp av solceller, og at sikringsstørrelsene mellom bolig og ladeuttak kan være begrensende med dagens system. Estimater er vist i figur 4.1 hvor den teoretiske kapasiteten ligger på nesten 100 GW, mens den

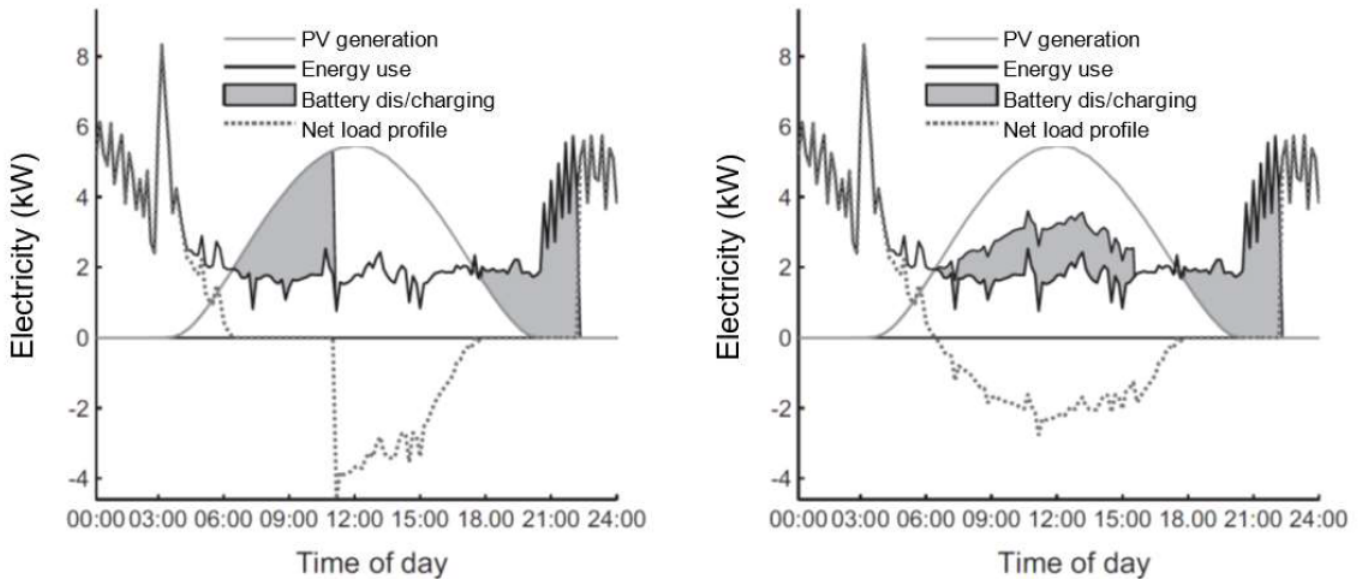
realistiske kapasiteten ligger på 4-8 GW. Forbruksrekorden i Norge en kald vinterdag ligger på 24,5 GW, derav ca 33 % reduksjon av den nåværende belastningen.



Figur 4.1: Mulig utvikling av batterikapasitet med begrensninger på sikringsstørrelse [34].

Lønnsomheten for brukeren avhenger imidlertid av at strømprisvariasjonene gjennom døgnet er tilstrekkelige. Det kan derfor være lurt å øke prisvariasjonene, som reflekterer de periodevise høye effekttoppene. Lavere effekttopper kan i tillegg til å hindre ytterligere utbygging, øke stabiliteten i nettet og øke muligheten til å benytte uregulerbar fornybar kraft, og dermed redusere den fossile andelen. [34]

Figur 4.2 viser et eksempel der solceller lader opp et batteri ved overskuddsenergi midt på dagen. De to ulike versjonene illustrerer hvordan netto effektprofil kan unngå store svingninger dersom energibehovet er kjent. Ved å vite når og hvor lenge solcellene leverer overskuddsenergi, kan batteriet lades opp over en lengre periode, og man unngår store hopp og dropp i effektbehovet, som vist i figur 4.2.



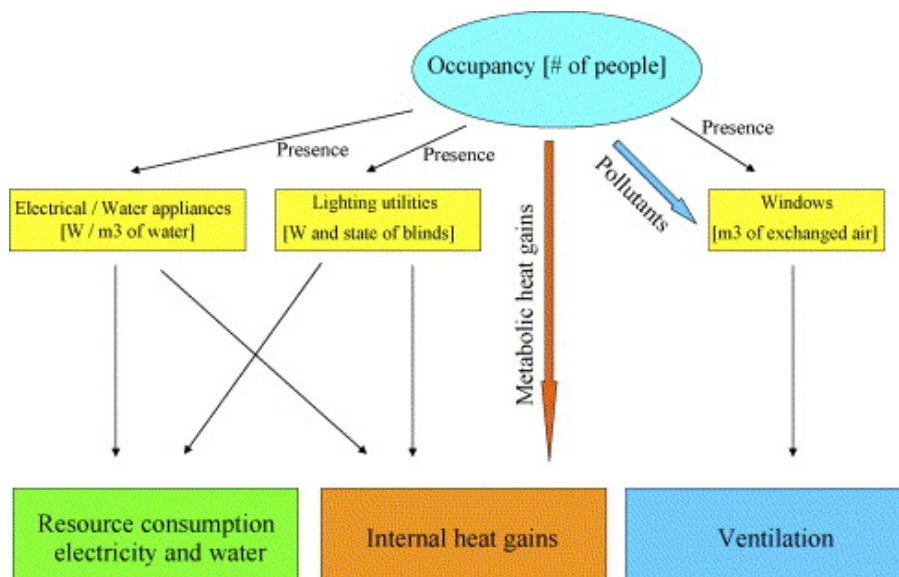
Figur 4.2: Opp- og utladning av et batteri i sammenheng med effektprofiler [35].

Denne metoden kan også brukes til en såkalt *peak shaving* der batteriet lades ut ved de høyeste toppene i bygningens elektrisitetsbehov. Ved å fjerne de høyeste lokale toppene i bygningen, vil effektleddet av prisen bli redusert. Ved å fjerne toppene der det er høyest etterspørsel i distribusjonssystemet vil energiprisen og belastningen på nettet bli lavere, og ofte er disse hendelsene synkronisert. En *peak shaving* kan utføres ved hjelp av en elektrisk bil, en annen form for energilagring eller kun gjennom bevisstgjøring av effektprofilen til en bygning, slik at effektkrevede prosesser kan flyttes til en annen tid på døgnet. [36]

Key Performance Indicator (KPI) er en enhet som beskriver avgjørende faktorer for at bygningen og bygningsdeler skal fungere som ønsket. Viktige KPI'er innenfor energilagring er for eksempel lagringskapasitet, maksimum lade- og utladningskapasitet, levetid og spesifikke kostnader. [37]

5. Drift og bruk av kontorbygninger

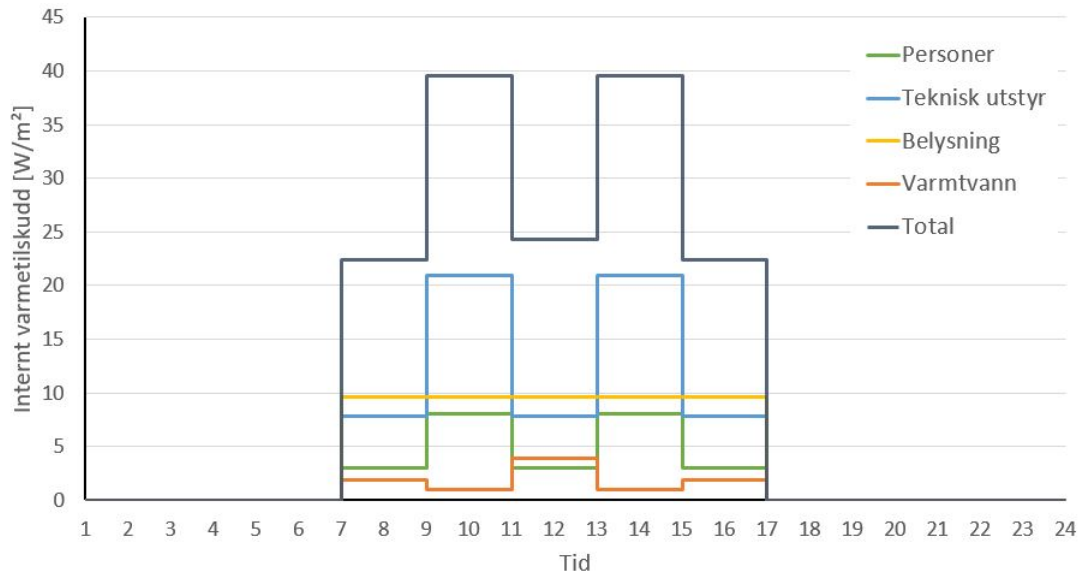
Hvordan en bygning driftes og brukes har stor innvirkning på energiforbruket. Page et al. [38] og Wang et al [39] delte menneskelig opptreden inn i to kategorier: Selve brukerne og brukernes interaksjon med bygningen. Figur 5.1 illustrerer en stokastisk modell, som viser hvordan disse to kategoriene henger sammen, og at brukernes interaksjon med bygningen er avhengig av tilstedeværelsen av ulike brukere. Interaksjon med bygningen, som bruk av lys, teknisk utstyr og åpning av vinduer, resulterer i ressursforbruk av elektrisitet og vann, internt varmetilskudd og ventilering av bygningen.



Figur 5.1: Oversikt over brukernes interaksjon med en bygning [38].

5.1 Brukerprofiler i Byggteknisk Spesifikasjon, TS 3031

Brukerprofilene som stort sett blir brukt i bygningssimulering idag er statiske og deterministiske, og gir derfor en dårlig indikasjon på reelle situasjoner. Dette gir et avvik mellom simulerte og målte verdier som forklart i innledningen. Teknisk Spesifikasjon 3031 har utviklet brukerprofiler for varmtvann, brukere, teknisk utstyr og belysning for ulike bygningskategorier, som ofte blir brukt i dagens simulering. Disse er basert på normerte inndata for å dokumentere energiytelse med standardiserte betingelser [17]. Selv om disse er en god indikasjon på gjennomsnittlig effektbruk og varmeavgivelse, vil ikke menneskets stokastiske og uregelmessige bevegelser fanges opp. Profilene for kontorbygninger er presentert i figur 5.2 for personer, teknisk utstyr, belysning, varmtvann, samt total internlast.



Figur 5.2: Brukerprofiler fra TS 3031 med effektvariasjoner for kontorbygninger [17].

5.2 Variasjon i drift og bruk

En undersøkelse av bygninger som er klassifisert innenfor passivhusstandarden gir et innblikk i ulike variasjoner som kan oppstå i bygninger innenfor drift og bruk. Tabell 5.1 presenterer et utvalg av kjente variasjoner i kontorbygningene Visund i Haakonsvern og Powerhouse Kjørbo i Sandvika. Verdiene er basert på målinger og estimat etter en bruksperiode.

Tabell 5.1: Variasjoner innenfor drift og bruk i ulike kontorbygninger i Norge

Bygning	Beskrivelse av avvik	Tilsvarende verdi i standarden
Visund, Haakonsvern [40]	Setpunkttemperatur på 22,5°C Bruk av romkjøling SFP-faktor på 0,5 kW/(m ³ /s) Utstyr og lys utenom driftstid på hhv 1,2 og 2,1 W/m ²	21°C Kjøling ved DUT _s >20°C 1,5 kW/(m ³ /s) 0 W/m ²
Powerhouse Kjørbo [41]	Høyere setpunkttemperatur 2,25 kWh/m ² til varmtvann Høyere energibehov til belysning, der 40% brukes utenom driftstid	21°C 5 kWh/m ² 4 W/m ² , 0 utenom driftstid

Andre typiske forskjeller fra bygg til bygg er for eksempel antall personer, muligheten for å åpne vinduer, nattesenking av temperatur eller ikke, og ventilasjonsmengde.

5.3 Definisjon og modellering utgitt av International Energy Agency

International Energy Agency (IEA) er en global energimyndighet som ble stiftet i 1974, som et samarbeid mellom 24 land med tanke på forstyrrelsene og usikkerhetene rundt oljeforsyningen. Dette samarbeidet har i senere tid flyttet fokus over på de tre hovedområdene, global forsyningssikkerhet, utvidelse av samarbeid og dialog rundt energispørsmålet mellom ulike land, og fremme en miljøvennlig og bærekraftig energifremtid. [42]

Innenfor programmet Energy in Buildings and Communities (EBC) ble det i mai 2018 utgitt rapporten Annex 66 [42], som omhandler definisjoner og simuleringer av menneskelig adferd i bygninger. Annex 66 [42] var et prosjekt som ble gjennomført av 100 forskere i 20 land som samarbeidet for å utvikle standardiserte og kvantitative beskrivelser og modeller av energirelaterte brukermønstre i bygninger. En av rapportens hovedkonklusjoner er at brukermønstre har en signifikant betydning på energibruk i bygninger. Her er utviklingen av metoder og modeller viktig for forståelsen og forbedringen av bygg, hvor gapet mellom simulerte og målte verdier blir redusert.

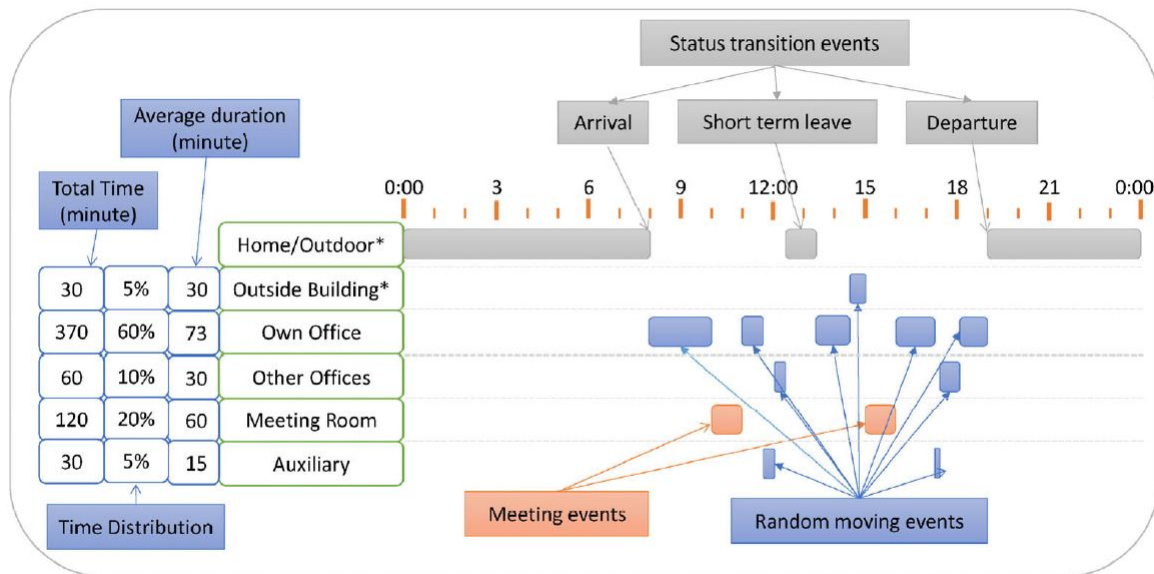
Metoder for måling, modellering og evaluering av bruksmønstre ble fastslått, samt hvordan denne informasjonen implementeres i ulike bygningssimuleringsprogram. Dette er fremstilt i tilsammen fem tekniske rapporter, tre modelleringsverktøy for bruksmønstre og 103 tidsskrifter. Et av disse modelleringsverktøyene er *Occupancy Simulator*, som er utviklet som en del av denne forskningen.

5.3.1 Modelleringsverktøy for brukerprofiler

Occupancy Simulator er et verktøy som simulerer tilstedeværelse i en bygning, utviklet av Tianzhen Hong og hans team. Applikasjonen simulerer bevegelse ved hjelp av Markov-chain modellen utredet av C.Wang et al. [39] og X.Feng et al [43]. Markov-chain er en stokastisk modell, som definerer mulige tilfeldige hendelser kun basert på forrige hendelse. Ut i fra definerte variabler med tanke på antall mennesker, romtype og spesifikke hendelser, blir brukernes bevegelse og timeplaner i hvert enkelt rom simulert ved hjelp av Markov-chain.

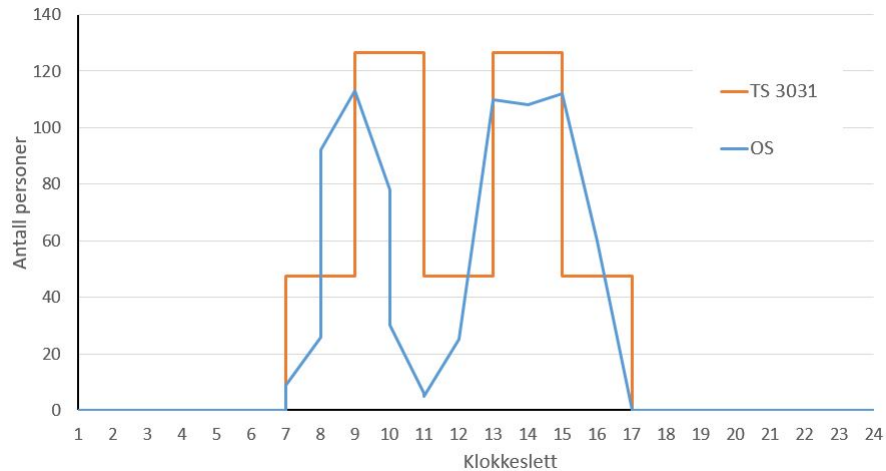
Gjennom Annex 66 ble det utført målinger på mange ulike kontorbygninger over hele verden, og det ble etablert stokastiske modeller for isolerte deler av bygningen. Målet med *occupancy simulator* var å sette sammen disse og simulere et helt bygg med ulike rom og brukere, slik at det lettere kunne implementeres i *Building Performance Simulation* -programmer (BPS), som IDA ICE. Resultatet baserte seg i hovedsak på forskningen av tre ulike bevegelsesmønstre, og er illustrert i figur 5.3. En Lightswitch-modell av Reinhart [44] kunne overføres til bevegelse

inn og ut av bygget og er representert i grått, en modell over tilfeldige bevegelsesmønster av Wang et al.[39], representert i blått, og en modell over møteaktivitet representert i rødt. [45]



Figur 5.3: Skjematisk oversikt over framgangsmåten til Occupancy Simulator [45].

Bevegelsesmønstrene simuleres og blir fremstilt i grafer over en valgt tidsperiode. Disse grafene kan lastes ned som en figur, eller i CSV- og IDF-format, som lettere kan implementeres i bygningssimuleringsprogram. Figur 5.4 viser et eksempel på en vilkårlig utvalgt dag i mars med bruksmønster for en hel kontorbygning på 2040 m² i *Occupancy Simulatoren*(OS). Til sammenligning er bruker-grafen fra TS 3031 gjort om til et estimat på antall personer i en tilsvarende stor bygning, hvor det er antatt 126 W varmeavgivelse per person, tilsvarende et aktivitetsnivå på 1,2 met ved kontorarbeid [46].



Figur 5.4: Brukerprofiler for antall personer i en kontorbygning på 2040 m².

Det er ikke gitt hvilke av disse grafene som gir et mest nøyaktig bilde, med mange antatte faktorer i begge grafene. Svakheter og begrensinger med *Occupancy simulator*'en er blant annet at den ikke tar hensyn bevegelse mellom rommene, samt sykdomstilfeller og ferie utenom offisielle fridager, tilstedeværelse er uavhengig av inneklimate og det er begrenset data for møteromsmodellen, med målinger fra kun ett møterom [47]. Det kan også se ut til at modellen tar utgangspunkt i at brukerne forlater bygningen for å spise lunsj, noe som er uvanlig i Norge, hvor de i stedet forflytter seg til en kantine i samme bygning. Fordeler med den simulerte brukerprofilen er de stokastiske variasjonene, med ulike profiler hver dag over hele året, og tilsvarende forskjeller fra rom til rom. Dette gjør det enklere å definere den såkalte sammenlagingsfaktoren som forklares nærmere i kapittel 7.

6. Energiplanlegging i prosjektering av nybygg

I veien mot å dekke et energibehov, må man først ta hensyn til faktorer som miljø og samfunn, teknologi og økonomi. Denne prosessen kalles energiplanlegging. Det må velges ut en strategisk tilnærming mot et resultat, der ulike scenarier blir avdekket. Her er det flere veier for å oppnå det samme målet, og det er derfor viktig å vurdere hvordan den valgte modellen fungerer, og hvor forståelige og realistiske resultatene er. [48]

Metoden som er valgt i første delen av dette prosjektet er simulering og kan defineres som en metode eller prosess hvor ethvert system med likheter kan bli representert av en enklere eller mindre kompleks modell. [48]

Bygningssimulering har blitt brukt i bygningssektoren siden 60-tallet, men startet i hovedsak med å simulere varme-, kjøle- og ventilasjonssystemer (HVAC-systemer). Det var ikke før tidlig på 70-tallet det ble et større fokus på energibruk i bygninger, bygningskropp og tekniske systemer, som nevnt i kapittel 3.4 *Historisk og fremtidig utvikling*. Omkring 1977 ble det rettet oppmerksomhet rundt passive og innovative designstrategier, noe som innebar arkitektoniske modifikasjoner i bygningssimuleringen. Daværende programmer måtte derfor gjennomgå store forandringer og endring av programkodene, og startet dermed en ny generasjon av bygningssimulering. [49]

Det finnes mange forskjellige teknikker og algoritmer i programvarene for bygningssimulering, og det er fortsatt ingen standard framgangsmåte. I utviklingen av simuleringsprogram, mangler det fortsatt en omfattende testing og bruk av de ulike programvarene. Validering og kalibrering er derfor svært viktig i simuleringsprosessen. [49] På bakgrunn av dette er det fortsatt store forskjeller mellom målte verdier og simulerte verdier i bygninger. En studie av 121 bygninger har blant annet vist et avvik på opp til 250% fra simulert energibruk til målt energibruk, der den faktiske energibruken oftest er høyere enn den simulerte. [50]

Videre vil kapitlet presentere simuleringsprogrammet som er valgt ut i denne oppgaven. Kapitlet vil også forklare definisjonen på en referansebygning, samt utdype kalibreringsprosessen i etableringen av referansebygningen. Energiplanlegging vil også innebære at kunnskap videreføres til bygningseier, slik at den beste strategien blir gjennomført. Dette utdypes i slutten av kapitlet.

6.1 Bygningssimulering i IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) [51] er et simuleringsprogram utviklet av det svenske firmaet EQUA Simulation AB. Programmet er stadig i utvikling fra det ble lansert i 1998 til dagens versjon 4.8. Versjonen som er brukt i denne oppgaven er 4.7.1.

IDA ICE utvikler dynamiske modeller av inneklima og energibruk i bygninger, med hensyn til lokalt klima, lokale standarder, ulike materialer og tekniske systemer. Siden IDA ICE er tilpasset til det globale markedet, kan man med åpen programmering tilpasse de ulike systemene etter egne behov og bruksområder. Det vil si at det er mulig å hente ut ligninger og variabler for å følge med på prosessene i modelleringen, i tillegg til at man kan legge til egne komponenter i den aktuelle bygningen eller klimasonen. [52]

En annen fordel med IDA ICE er muligheten til å importere eksisterende 2D og 3D-tegninger fra en bygningsinformasjonsmodell (BIM), som ofte blir brukt i dagens prosjektering av bygninger. Denne funksjonen minimerer arbeidet, da den allerede inneholder mye av dataunderlaget som er nødvendig for simulering av geometri, bygningskonstruksjon, HVAC, og elektrisk informasjon. Deretter kan man legge inn de resterende parametrene, som ikke kan behandles i de aktuelle BIM-programmene direkte. Denne funksjonen er derimot ikke brukt i dette prosjektet på grunn av manglende tilgang på aktuelle tegninger av referansebygg. [52]

Validering av programvare er viktig for å forsikre at resultatene er pålitelige. IDA ICE er blant annet validert i henhold til ASHRAE 140 og *Comité européenne de normalisation* (CEN) Standard EN 15255 og 15265, som tilsvarer Norsk Standard (NS)-EN 15265 [53, 54]. Det ble utført 12 tester der alle kom innenfor nøyaktighetsnivå C som er minstekravet, og under oppvarmings-testene kom 9 av 12 på nøyaktighetsnivå A, som er det beste. Denne standarden ble imidlertid trukket tilbake i 2017, og erstattet av NS-EN ISO 52016-1:2017 [55].

6.2 Definisjon av en referansebygning

En referansebygning kan brukes som første evaluering av energibalanse og inneklima allerede på designstadiet. Her kan parametrene endres og varieres for å finne den optimale løsningen for det planlagte bygget. En referansebygning kan også være et objektivt sammenligningsobjekt for ulike prosjekter. Det finnes altså ikke en standard definisjon på hva en referansebygning er og hvordan den etableres. Mange studier bruker likevel tilnærmet lik framgangsmåte med omtrent de samme forutsetningene. [56]

Den tidligere nevnte Corgnati et al.[9], tok blant annet utgangspunkt i definisjonen til Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) i EU; *Bygninger som karakteriseres av- og representerer sin funksjonalitet og geografiske beliggenhet, inklusive innendørs og utendørs klima-*

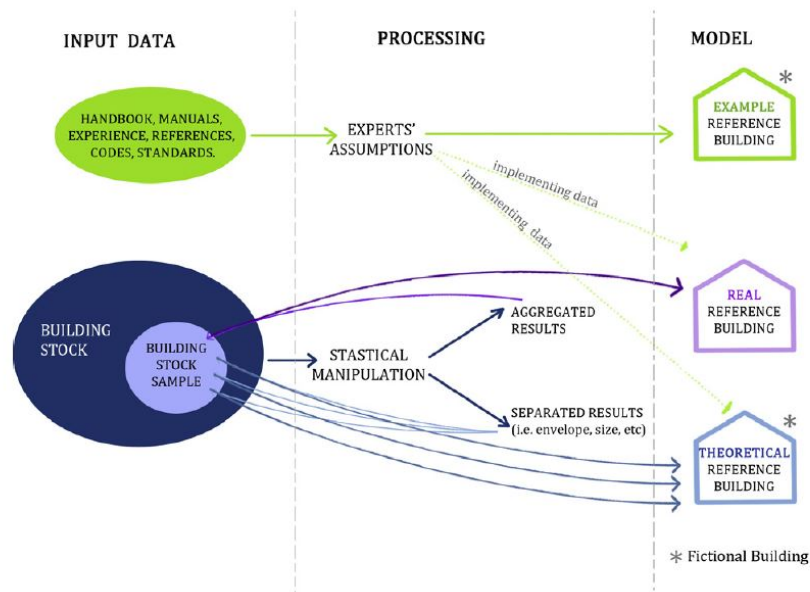
forhold. Videre utdyper Corgnati et al.[9] at generelt sett er målet å karakterisere energiforløpet til en typisk bygningskategori under typiske driftsforhold. Metoden krever tilstrekkelig med informasjon innenfor de definerte hovedområdene:

- Bygningsgeometri
- Bygningskropp
- Tekniske systemer
- Drift og bruk

Prosessen med å samle inn all denne informasjonen kan være omfattende og det krever systematikk i sorteringen. Hvor det hentes informasjon fra, er med på å definere hvilken type referansebygning som etableres og påliteligheten til utførte simuleringer. Modellene klassifiseres innenfor tre kategorier, *eksempel*-referansebygning, *ekte*- referansebygning og *teoretisk*-referansebygning, og blir beskrevet av Corgnati et al.[9] som følger:

1. *Example (Reference) Building*. Denne metoden er stort sett brukt når det ikke er tilgjengelige statistiske data. Informasjonen er hentet fra forskning og antagelser gjort av eksperter, og kombineres med informasjon fra fagbøker, standarder og manualer. Kombinasjonen fra ulike ekspertiser sørger for en bygning som representerer bygningskategorien innenfor et gitt område og spesifikk byggeperiode.
2. *Real (Reference) Building*. Referansebygget som blir brukt er svært typisk for sin kategori og er en eksisterende bygning, som er blitt valgt ut i fra en statistisk analyse. Det er nødvendig med tilstrekkelig tilgang på informasjon på alle de fire hovedområdene for å utføre denne metoden.
3. *Theoretical (Reference) Building*. Dette referansebygget opprettes basert på statistiske data, og representerer materiale og systemer som er de mest brukte innen for samme bygningskategori.

Figur 6.1 illustrerer retningene som er beskrevet over. Det er mulig å bruke kun en metode, eller kombinere retningene, som vist i figuren.



Figur 6.1: Generell metode for å etablere referansebygninger.[9]

6.3 Kalibrering av en referansebygning

Bygningssimulering er kjent som den beste tilnærmingen for å analysere inneklimate og energibruk, selv om det, som tidligere nevnt, er påvist store avvik fra simulering til målte verdier ved drift av en bygning. På grunn av disse avvikene er kalibrering av referansebygningene et viktig hjelpemiddel for redusere forskjellene, og i lengden forbedre simuleringsprogrammene ved å undersøke hvor avvikene i hovedsak ligger. Selv om det er mange publiserte case-studier på dette området, er det fremdeles ikke utarbeidet en standard fremgangsmåte for kalibrering av referansebygninger. [50]

Studien *Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology* av Paul Raftery et al.[50] undersøker ulike metoder for kalibrering av bygningsmodeller mot målte data, og beskriver en bevis-basert metode for denne kalibreringen. Metoden krever imidlertid forståelse og kunnskap for å fastslå ugyldige verdier av den som utfører analysen. Studien poengterer også hvordan mangel på målte data påvirker de ulike casene, samt utførelse av kalibreringen.

Det er ønskelig med timesverdier over et år fra en eventuell referansebygning, men er også mulig å bruke måneds- eller årsverdier. For en enda mer detaljert kalibrering er del-verdier fra, for eksempel, den aktuelle sonen nyttig hjelpemiddel ved søk etter feilkalibrerte områder. I hovedtrekk trengs den opprinnelige referansebygningen, en historisk væroversikt og kalibreringsdata, før en kalibrering kan utføres. Dette skjer i systematisk rekkefølge, der resultatet analyseres mellom hver endring.

Raftery et al.[50] presenterer et kilde-hierarki i kalibreringsprosessen, der det presiseres at det ikke skal foretas endringer i modellen, med mindre endringen kommer fra en kilde som ligger høyere i hierarkiet. På denne måten sikrer man at kalibreringen utelukkende er basert på bevis. Det er også en fordel å dokumentere hele prosessen ved å lagre alle endringene som blir gjort i programvaren. Rekkefølgen for pålitelige kilder settes individuelt for hvert prosjekt, men kan bestå av følgende punkter;

1. Målinger registrert i datalogg
2. Punkt- eller korttidsmålinger
3. Direkte observasjoner
4. Intervju med driftspersonell
5. Driftsdokumenter
6. Oppdragsdokumenter " som bygget-dokumentasjon "(as built)
7. Referansestudier på området
8. Standarder og tekniske forskrifter
9. Informasjon fra designstadiet(opprinnelig modell)

6.4 Kommunikasjon med byggherre

I dette delkapittelet vil det bli presentert to studier der forholdet mellom oppdragsgiver og oppdragstaker blir analysert. Den første studien ser på effektiv kommunikasjon mellom arkitekt og klient, som kan relateres til ingeniør og byggherre. Den andre studien er en masteroppgave som ser på tilrettelegging for høy kvalitet på kunnskapsoverføringen mellom prosjektering og produksjon i et totalentrepriseprosjekt.

Rapporten " The architect, the client and effective communication in architectural design practice " er utarbeidet av Norouzi et al. [57] i 2015. Studiet er gjennomført på bakgrunn av at utviklingen fører til mer kompliserte prosjekter, med komplekse designkonsept og utvikling av teknologi og programvare. Dette vil si mer informasjon som skal formidles mellom ulike parter, og tvetydighet kan dermed føre til mistillit og dårligere kommunikasjon.

Studiet legger frem metoder for å bedre kommunikasjonen innenfor arkitektur, og framhever følgende[57]:

- Informasjonen som legges inn i BIM er tilført av flere aktører og når denne prosessen er riktig organisert, blir det lettere å kommunisere med klienten. Et felles kommuni-

kasjonsnettsted der all informasjon innen prosjektet tilføres, både e-poster, programvare, tegninger og BIM, vil forenkle denne organiseringen.

- Meldingene som sendes mellom partene bør være troverdige, nøyaktige og aktuelle. Troverdighet og nøyaktighet utfyller hverandre, i og med at en nøyaktig melding, som beskriver hvor godt klientens ønsker er ivaretatt, vil føre til troverdighet. Aktualitet er like viktig, der avgjørelser som blir tatt i design- og konstruksjonsfasen bør informeres om med en gang, slik at tiltakene faktisk kan gjennomføres med godkjennelse fra klient.
- Dokumentene for krav til bygningsdesign må gjenspeile klientens ønsker, slik at arkitekten kan opprette en kommunikasjon med klienten og møte kravene best mulig. Det må bygges opp gjensidig tillit, like ønsker og lik kunnskap.

Masteroppgaven har tittelen " Tilrettelegging for god kunnskapsoverføring mellom prosjektering og produksjon i totalentrepriseprosjekter " og er skrevet av Ellen Thuestad Løkås i 2014 [58]. Oppgaven er skrevet på bakgrunn av et samarbeid med Veidekke ASA der de vil finne ut hvorfor de fleste feilene i prosjekter oppstår i prosjekteringsfasen. Det er mange aktører knyttet til denne fasen, og mye informasjon som skal sorteres og videreformidles til produksjonen.

Funnene som blir lagt fram er at hindringene i prosjekteringen oppstår på grunn av dårlige- og manglende tegninger, samt mangelfull overlevering. Grunnen til dette kan være manglende involvering av driftspersonell og underentreprenører, dårlig håndtering av de faglige grensesnittene og manglende involvering av byggherre. Årsakene til mangelfull overlevering kan være knyttet til sene leveranser, mangelfull planlegging og teknologibruk, samt tidspress i faseovergangen.

Noen av tiltakene som blir foreslått for å forbedre aktivitetene i prosjekteringen er[58]:

- Bedre involveringen med driftspersonell, underentreprenører og byggherre.
- Samlokalisere prosjektering og produksjon.
- Øke kunnskapsnivået og interessen for BIM, og innføre krav om bruk av åpen BIM.
- Se på mulighetene for å etablere en standard mal for hvordan tegninger og særlig målsetting skal fremstilles.

7. Energiplanlegging av større bygningsområder

Bygningssektoren er i utvikling, og det etableres stadig mer effektive måter å planlegge og prosjektere ny bygningsmasse på. Dagens tendenser ser på større områder, istedet for hver enkelt bygning isolert. På denne måten kan de tekniske anleggene, derav varme- og kjøleanlegg, dimensjoneres større og mer effektivt. Zero Emission Neighbourhood, ZEN, er et eksempel på dette.

I likhet med planlegging av en enkelt bygning, vil det være et behov for å kunne forutsi energi- og effektbehovet på hele området samlet. Her er det to metoder som i hovedsak blir brukt, fysisk modellering og en matematisk informasjonsbasert tilnærming. IDA ICE, som ble beskrevet tidligere, går under kategorien fysiske modelleringverktøy. Ulempen ved å bare benytte seg av denne metoden er at den krever informasjon på detaljnivå, noe som ofte ikke er tilgjengelig på designstadiet. Mangel på riktig informasjon vil fort gi unøyaktige simuleringer og dermed stort avvik mellom målte- og beregnede verdier. [59, 60]

Matematiske informasjonsbaserte formler er ikke like avhengig av eksakte data. Her benyttes statistiske forhold mellom ulike parametre, samt historiske data for å forutsi energibruken i ulike bygninger og bygningsområder. Det er behov for forenklede modelleringsverktøy på områdeplanlegging på grunn av den såkalte sammenlagersfaktoren, som forklares nærmere i det påfølgende delkapittelet 7.1.

7.1 Sammenlagersfaktor

Ved aggregering av effektprofiler til flere bygninger vil en sammenlagersfaktor spille inn, og effektbruken vil bli mer konsentrert. Sammenlagersing vil si at når topplasten inntreffer i en bygning, vil den ikke nødvendigvis inntreffe på samme tidspunkt i en annen bygning [61]. Når timesprofilene da legges sammen vil effektbruken som funksjon av antall bygninger gå ned.

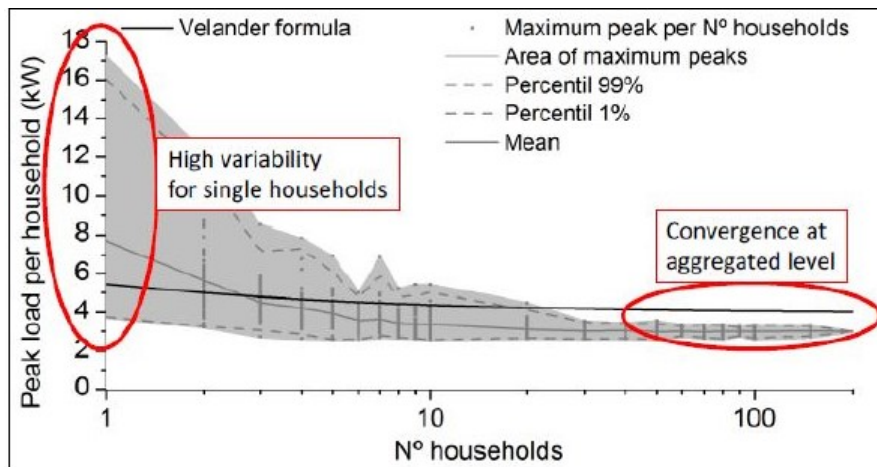
Sammenlagersfaktoren har en verdi mellom 0 og 1, der en faktor på en betyr at alle effekttoppene inntreffer på samme tidspunkt. I områder med ulike typer bygninger kan denne verdien bli svært lav, mens i et område med bare kontorbygninger vil verdien bli nærmere 1. Sammenlagersfaktoren kan beregnes ut i fra formel 7.1. [62]

$$s = \frac{P_{tot,maks}}{\sum_{i=1} P_{i,maks}} \quad (7.1)$$

Det fins ulike måter å legge sammen effektprofiler på, som tar hensyn til mulig sammenlagring. I Skandinavia har blant annet Velanders formel vært populær til å beregne høyeste effekt for området. Velanders formel 7.2 består av to empiriske koeffisienter som er basert på gjennomsnittlig elektrisitetsforbruk, k_1 og k_2 , en referanseverdi for årlig energiforbruk, E , og antall bygninger, n .

$$P_{max,n} = k_1 \cdot E \cdot n + k_2 \cdot \sqrt{E \cdot n} \quad (7.2)$$

Sartori et al. [32] har estimert energi- og effekttopper i et plussenergi-nabolag med opp mot 200 boliger, der Velanders formel er sammenlignet med detaljert stokastisk simulering. Dette er illustrert i figur 7.1. Til venstre i det grå området vises effektvariasjonen ved husholdninger som er beregnet som 200 separate enkeltbygninger. Mot høyre i figuren summeres timesverdiene i grupper basert på logaritmisk skala, hvor tilslutt timesverdiene til alle de 200 bygningene er summert, og variasjonen og effekttoppen synker.



Figur 7.1: Topplast per husholdning for et økende antall aggregerte husholdninger [61].

Overføringsverdien fra boliger til kontorbygninger i dette tilfellet kan imidlertid diskuteres, hvor energibruken i boliger har større svingninger enn i kontorbygninger. Generelt sett regnes formelen som pålitelig, men noe overdimensjonert ved store områder på opp mot 200 bygninger og tilnærmet like forutsetninger. Formelen er derimot ikke like treffsikker på mindre områder, som illustrert i figuren 7.1.

Det finnes alternative og forenklete metoder å komme fram til tilsvarende figur på, med et estimat på energi- og effektbehov i et område. Ulike statistiske prediksjonsmetoder beskrives nærmere i neste kapittel.

7.2 Statistiske prediksjonsmetoder for energibruk

De mest brukte og utprøvde metodene baserer seg blant annet på lineære og ikke-lineære regresjonsanalyser og algoritmer, kunstige nevralt nettverk (ANNs), støttevektormaskiner (SVM) eller beslutningstrær. Alle disse går under kategorien maskinlæringsalgoritmer hvor modellen lærer av tidligere resultater.

SVM er regnet for å være den mest robuste og presise algoritmen [60]. Den benytter en kernalbasert fremgangsmetode. Et ulineært problem kartlegges og deles i to lineære funksjoner. ANNs er likevel antatt å være mer populær, og er en ikke-lineær beregningsmodell, som er inspirert av hjernen. Uavhengig av dette er metodene ansett for å være avanserte og kan kreve spesielle programvarer, detaljert informasjon og lang simuleringstid. De er derfor ikke like anvendelige for konsulentfirmaer. Beslutningstrær og andre statistiske metoder som for eksempel lineær regresjon, er mindre avanserte, og ofte mindre presise. ZEN har blant annet benyttet seg av en metode innenfor lineær regresjon, som forklares nærmere i delkapittel 7.2.1 under.

Oppsummert har alle metodene ulike bruksområder, med både styrker og svakheter. Rapporten *A review of data-driven building energy consumption prediction studies* [60] har analysert mange av de eksisterende metodene og kan brukes til å avdekke hvilken fremgangsmåte som egner seg til ulike prosjekter. Det ble også avdekket hvilke områder det er mangel på forskning og anvendelige metoder innenfor informasjonsbaserte algoritmer, hvor påvirkning av drift og bruk på energibruken var et av temaene.

Denne masteroppgaven prøver å se på nettopp dette temaet, ved å kombinere et fysisk modelleringsverktøy, IDA ICE, og en bayesiansk nettverkstilnærming innenfor kategorien maskinlæringsalgoritmer. Et bayesiansk nettverk [63] er en grafisk modell, som representerer en gruppe tilfeldig variabler basert på en gitt sannsynlighetsfordeling. Monte Carlo-simulering i Microsoft Excel er en teknikk innenfor det bayesianske nettverket og forklares i delkapittel 7.2.2.

7.2.1 Energi- og effektprofiler basert på regresjon utviklet av ZEN

Basert på PhD-oppgavene til Linda Pedersen[64] og Karen Lindberg[65], er det utviklet et predikasjonsverktøy av effektprofiler i bygninger i Microsoft Excel. Programmet er utviklet for FME ZEN partnere (The Research Centre on Zero Emission Neighbourhoods in Smart Cities), der Igor Sartori er kontaktperson for programvaren. Med bakgrunn i prinsippet fra studien om de 200 boligene i forrige delkapittel, blir det ut i fra variabler som areal, bygningstype og temperatur, produsert aggregerte energi- og effektprofiler ut i fra et antall reelle energimålinger.

PhD-en til Linda Pedersen fra 2007 heter " Load Modelling of Buildings in Mixed Energy Distribution Systems ". Avhandlingen etablerer en ny metode for effektmodellering av bygninger

i distribusjonssystemer med blandet energitilførsel basert på lineær regresjon. Det skilles mellom termisk effektbehov og elektrisk effektbehov, der det termiske består av romoppvarming, ventilasjonsvarme og varmtvannsbehov. [64]

Studiet til Karen B. Lindberg fra 2017 heter " Impact of Zero Energy Buildings on the Power System ", og undersøker hvilke påvirkninger energieffektive og strømproduserende bygninger(ZEBs) har på det etablerte strømnettet. På bakgrunn av dette blir effektkurvene til ZEB-bygninger undersøkt og sammenlignet med eksisterende bygningsmasse. Også her skilles det mellom termisk varmebehov og elektrisk behov. Lindberg utvikler en metode for aggregering av den totale effektprofilen til den norske bygningsmassen, for å finne påvirkningen av en relativt stor implementering av ZEB-bygninger. [65]

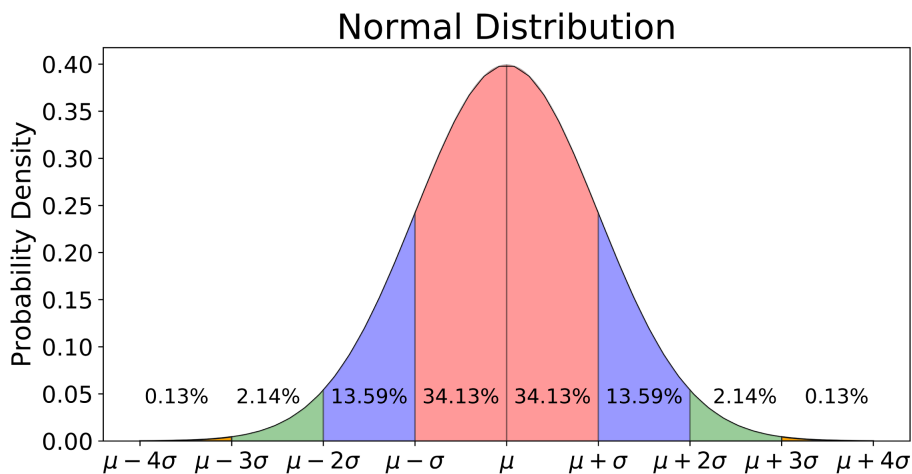
Programmet skiller mellom ni ulike bygningstyper, og er utelukkende basert på utetemperatur. Areal på bygning og temperatur er variablene, hvor effektkurvene blir beregnet på bakgrunn av lineær regresjon utarbeidet av Karen Lindberg og Linda Pedersen. Kategorien for kontorbygninger skiller mellom normale og energieffektive bygninger, og det er mulig å aggregere ulike bygningstyper til et felles område. Ved et større antall bygninger innenfor samme kategori derimot, er det kun mulig å øke antall kvadratmeter, og energi- og effektbruken vil øke lineært. Det tas ikke hensyn til sammenlagingsfaktoren innenfor samme bygningskategori.

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i kontorbygninger, for å avdekke denne mangelen, og finne en pålitelig referansmodell for aggregering av flere kontorbygninger innenfor samme område.

7.2.2 Microsoft Excel og Monte Carlo-simulering

En Monte Carlo-simulering (MCS) gir et usikkerhetsestimat uten behov for avanserte matematiske tilnærminger, og angir et utfall basert på sannsynlighet. Metoden bruker algoritmisk-genererte pseudotilfeldige nummer, som er tvunget til å følge en gitt sannsynlighetsfordeling [66]. Med andre ord produseres det en stokastisk modell med et tilfeldig resultat innenfor gitte rammer.

Ut i fra ønsket resultat utføres en MCS med ulike fremgangsmåter, med bakgrunn i forskjellige sannsynlighetsfordelinger. Den mest anvendelige metoden baserer seg på normalfordeling, også kalt Gauss-kurven, som illustrert i figur 7.2. Variasjonen av tilfeldige nummer er forutbestemt av en gitt sannsynlighet, spesifisert gjennomsnitt (μ) og standardavvik (σ). I Excel praktiseres denne fremgangsmåten med formel 7.3, der sannsynligheten uttrykkes gjennom et tilfeldig tall mellom 0 og 1, med formelen RAND(). [66]



Figur 7.2: Illustrasjon av normalfordeling innenfor Monte Carlo [67].

$$= \text{NORM.INV}(\text{RAND}(); \mu; \sigma) \quad (7.3)$$

Ved hjelp av et standardavvik og en gjennomsnittsverdi, som er etablert gjennom målinger eller fysisk simulering i IDA ICE, kan en Monte Carlo-simulering etablere ønsket antall bygninger med mangfold i henhold til gitte variasjoner.

8. Metode for utvikling av referansebygning

Litteraturstudiet presenterer viktig bakgrunnskunnskap for å kunne etablere en referansebygning, med teori innenfor energibruk og energieffektivisering i bygninger, samt tilhørende lovkrav og standarder. Teorien om energiplanlegging legger fram en generell base på fire hovedområder: Bygningsgeometri, bygningskropp, tekniske systemer og drift og bruk. Referansebygningen er utviklet på bakgrunn av disse fire områdene. Innenfor denne rammen kan en referansebygning utvikles på flere måter, med ulike måter å samle inn data på.

Dette kapitlet vil først beskrive casestudiet som det er tatt utgangspunkt i og hvilke kilder som er brukt. Deretter forklares fremgangsmåten som er utført i IDA ICE steg for steg, før det blir gjort en analyse av simuleringsresultatene. Denne analysen har som mål å validere resultatet og sikre at bygningen er representativ for en kontorbygning.

8.1 Generell casestudie og datainnhenting

Referansebygningen skal representere den generelle kontorbygningen, hvor informasjonen kan brukes i fremtidige byggeprosjekter. Det finnes i utgangspunktet lite tilgjengelige statistiske data, og informasjonen må derfor hentes fra standarder, fagbøker og eksperter, som forklart i kapittel 6.2 *Referansebygning*.

Utviklingen viser at bygninger blir mer og mer energieffektive, og det blir større utbredelse av for eksempel ZEB og ZEN. Felles for mange av nybyggene, med og uten egen energiproduksjon, er en tett og kompakt bygningskropp med minimal bruk av fossilt brensel. Det er derfor valgt å gå ut fra Passivhusstandarden, som er den standarden med strengest bygningskrav per dags dato. Der denne standarden mangler informasjon benyttes TS 3031.

Energikildene i referansebygningen er bestemt med bakgrunn i litteraturstudien om tekniske systemer i kapittel 4.1. En varmpumpe dekker grunnlast, mens elektrisitet benyttes til topplast. Fjernvarme er valgt bort på grunn av usikkerhet rundt aktuelle fjernvarmestasjoner, derav temperaturer og virkningsgrader. Det er ikke installert kjøling i bygningen, da kjølebehovet er så lite at det kan dekkes av kjølebatteri i ventilasjonssystemet. Det er heller ingen dataserver i bygningen, som ofte er grunnen til at mange må installere kjøleanlegg.

8.2 Etablering av referansebygning

Dette kapitlet forklarer stegene og verdiene som ble satt inn i IDA ICE for etablering av referansebygningen for et kontorlokale. Kildene som er brukt er blant annet Passivhusstandarden

NS 3701 [18], Teknisk spesifikasjon NS 3031 [17] og der ikke annet er presisert blir standardverdiene i IDA ICE benyttet.

8.2.1 Bygningsgeometri

Geometrien har i hovedsak tatt utgangspunkt i ZEB-rapporten " A zero emission concept analysis of an office building " [68], som er utviklet for å kunne modellere og kalkulere energibruk og CO₂-utslipp fra den typiske norske kontorbygningen. I etterkant ble Haakonsvern, Visund kontorbygning ferdigstilt med den samme geometrien, og dette ble derfor sett på som et godt utgangspunkt for den generelle fremtidige kontorbygningen som skulle simuleres i dette prosjektet. Bygningen består av 4 etasjer med totalt bruksareal på 2040 m², og en kjeller med parkering og teknisk rom. Kjelleren regnes som uoppvarmet og er derfor neglisjert, men gulvet har en redusert U-verdi som kompensering. Bygningen har et fotavtrykk på 17x30 meter med et bruksareal på 510 m² per etasje. Dette skal representere et generelt kontorbygg, som inneholder både cellekontor, landskapskontor, møterom, trafikkområde og diverse våtrom/tekniske rom, som her kalles spesialrom.

NVE utga en rapport i 2013 om *Energibruk i kontorbygg* [8] hvor det presenteres et gjennomsnittlig bruksareal på kontorbygninger i alle fylker i Norge på 2350 m², med unntak av Oslo. Dette bekrefter at antagelsene i ZEB-rapporten, og et bruksareal på 2040 m² ligger ikke langt fra gjennomsnittet i 2013.

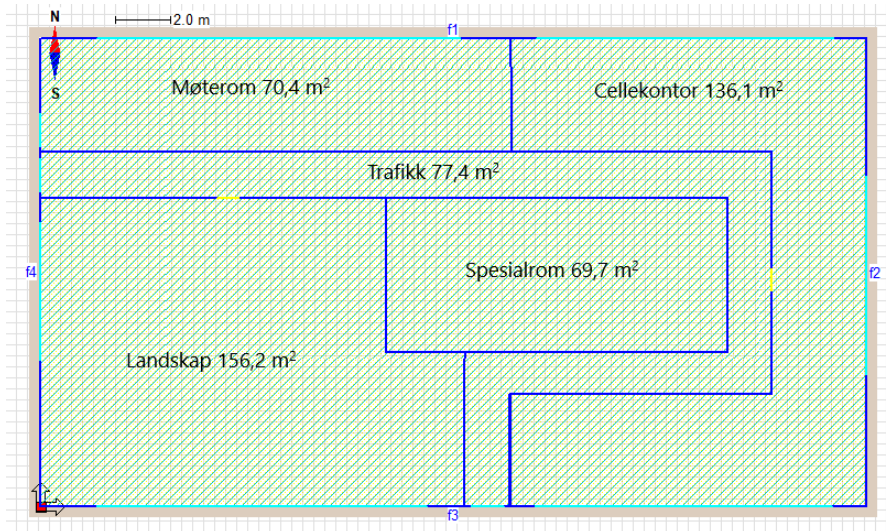
Det er mange faktorer som kan bestemme hvilken soneinndeling et bygg får. Soneinndelingen til referansebygningen er basert på bruksmønster, oppvarmings- og kjølebehov og ventilasjonsbehov. Ulike rom med ulikt bruksmønster har variasjon i størrelse, intern last og antall mennesker, noe som betyr at det tekniske anlegget må stilles inn ulikt i de forskjellige sonene. Soner kan også deles inn etter ytre klimatiske forhold, der soltilskudd og vind kan være avgjørende faktorer.

Soneinndelingen er basert på de fem nevnte hovedkategoriene, og størrelsen er bestemt ut i fra antall kvadratmeter rom per kategori fra modellen i ZEB-rapporten. Dette resulterte i fordelingen vist i tabell 8.1.

Tabell 8.1: Sonefordeling per etasje i referansebygningen.

Sone	ZEB etasje 1+2 [m ²]	Prosentandel	Areal [m ²]
Cellekontor	251	27 %	136,1
Landskap	291	31 %	156,2
Møterom	131	14 %	70,4
Trafikk	144	15 %	77,4
Spesialrom	121	13 %	69,7
Total	938	100 %	510

Orientering av bygget er på 0 grader med langsidene mot nord og sør. Sonene er plassert med arbeidsplasser ut mot vinduene, og trafikk og spesialrom er plassert i kjernen av bygget, vist i figur 8.1. Sonefordelingen er delvis basert på plantegninger i ZEB-rapporten, der det er tatt friheter med tanke på å danne en helhetlig sone med riktig areal.



Figur 8.1: Plantegning av soneinndeling i referansebygningen

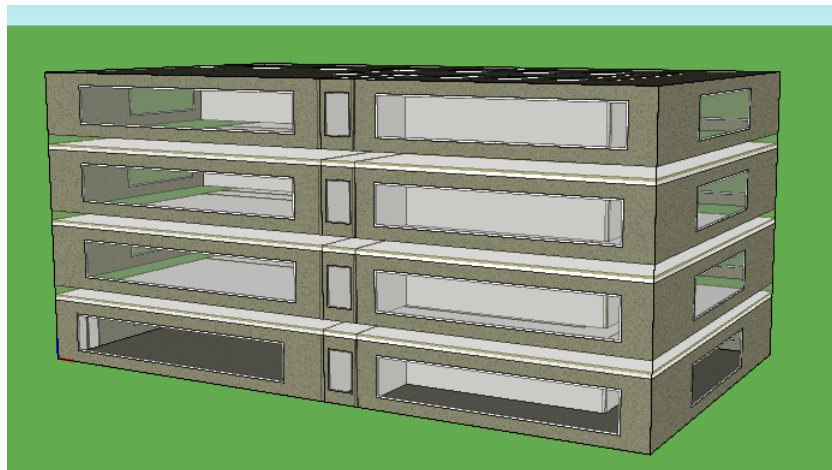
Nærområdet til denne bygningen er uvisst, og det er derfor ikke oppført skyggefaktorer som bygninger eller vegetasjon i denne referansebygningen. Det er imidlertid lagt på en standard ekstern solskjerm, som kalles *External blind (BRIS)*, på utsiden av vinduene for å ta bort noe av solinnstrålingen. De innsatte verdiene er vist i tabell 8.2 og følger standardverdiene som er lagt inn i IDA ICE.

Tabell 8.2: Skyggefaktorer for External blind(BRIS) hentet fra IDA ICE.

Skyggefaktor	Verdi
Solar gain factor	0,14
Short-wave shading coefficient	0,09
Diffusion factor	1
Multiplier for U-value	1

Lokale klimaverdier for Trondheim brukes med klimafil *NOR_TRONDHEIM-VERNES_012710_IW2.PRN* for Værnes, nedlastet fra IDA ICE sin database. Fra aktør til aktør, som benytter IDA ICE, kan det være stor forskjell i klimafilene som blir brukt i simulering. Ut fra dataenes opprinnelse, og hvilken årsperiode som er brukt, kan dette få store utslag på resultatene. Det er derfor valgt å ta utgangspunkt i standardfilen som ligger inne i IDA ICE sin database, utviklet av *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE).

Figur 8.2 viser en 3D-modell av bygningen i "skoeseke-format". Etasjehøyden er på 3.6 meter, med netto takhøyde på 2.9 meter.



Figur 8.2: Skjerm bilde av referansebygning i IDA ICE.

8.2.2 Bygningskropp

Bygningskroppen er utelukkende basert på passivhusstandarden, og det er derfor ikke tatt hensyn til valg av materiale. For å tilpasse riktig U-verdi, ble isolasjonstykkelsen regulert på standardelementene som er lagt inn i IDA ICE. Tabell 8.3 viser en oversikt over U-verdiene som er brukt, med en sammenligning til forskriften TEK17[15] og Passivhusstandarden.

Tabell 8.3: U-verdier fra TEK17, passivhusstandarden og referansebygningen [18].

U-verdier [$\text{W/m}^2\text{K}$]	TEK 17	NS3701 (passivhus)	Ref-bygning
Yttervegg	0,22	0,1-0,12	0,12
Tak	0,18	0,08-0,09	0,09
Gulv mot grunn	0,18	0,08	0,08
Vindu/dør	1,2	0,80	0,80
Normalisert kuldebroverdi	0,03	0,03	0,03
Luftlekkasjetall N50 [h^{-1}]	1,50	0,60	0,60

Vinduene har en høyde på 1,8 meter med varierende bredde. Vindusarealet ligger på 450 m^2 og tilsvarer 22% av bruksarealet. Det er antatt en neglisjerbar forskjell på energibruken ved å slå sammen vinduene i hver sone, kontra å ha mange like vinduer. Dette reduserer simuleringstiden betraktelig. Kuldebroer og lufttetthet er satt til en gjennomsnittsverdi, som vist i tabellen.

8.2.3 Drift og bruk

Drift og bruk kan ha stor innvirkning på det endelige resultatet, men er i denne modellen, som i TS 3031 og NS 3701, satt til lik verdi i alle sonene, både for menneske, tekniske anlegg, lys og utstyr. De gjennomsnittlige verdiene er vist i tabell 8.4, med driftstid fra kl 7-17 hver mandag-fredag, 52 uker i året. Brukerprofilene er hentet fra TS 3031 og er presentert i figur 5.2. Det er ikke tatt hensyn til valgfri fem-ukers ferie, men offentlige fridager er lagt inn etter norsk kalender.

Tabell 8.4: Verdier for til drift og bruk basert på NS 3701.

Beskrivelse	Verdi	Driftstid
Varme fra brukere	4 W/m^2	kl 07-17 (10/5/52)
Belysning	$3,25 \text{ W/m}^2$	
Utstyr	6 W/m^2	
Varmtvann	5 kWh/m^2	

Antall mennesker i bygningen er basert på den gjennomsnittlige varmen fra brukere vist i tabell 8.4. Brukerne holder et aktivitetsnivå på 1,2 met og klesnivå på 0,85 clo. Belysningen er basert på en gjennomsnittlig verdi på 4 W/m^2 med en reduksjon for dynamisk styring og dagslys på 10 % hver.

8.2.4 Tekniske systemer

Energikilde

Energikilden er en væske-til-vann varmepumpe med energibrønner, og en el-kjel til å dekke topplasten. Varmepumpen er dimensjonert gjennom en analyse av maksimal topplast i oppvarmingsperiode, med ideelle radiatorer og ingen påvirkning av interne laster. Utenom dette følger alle verdiene standardinstillingene i IDA ICE. Varmepumpen dekker 65% av det totale effektbehovet. Tabell 8.5 oppsummerer nøkkelinformasjonen for energiforsyning til bygningen.

Tabell 8.5: Nøkkelvrdier fra energiforsyningen til referansebygningen.

Beskrivelse	Verdi
Maksimal effekt ved oppvarming	34,2 kW
Dimensjonert effekt for varmepumpe	$34,2 \cdot 0,65 = 22$ kW
Navn på varmepumpe i IDA ICE	B2B_HP_MODEL
$COP_{varmepumpe}$	4
$COP_{EL-kjel}$	1

Ventilasjon

Det sentrale ventilasjonsanlegget består av vifter, varme/kjølebatteri, og en varmegjenvinner. Luftmengden følger anbefalingene som er satt i EN 15251, med et tillegg for varme- og kjølebatteri. Tillegget er satt ut i fra komfort-analyser og oppfølging av antall misfornøyde brukere (PPD) og innetemperatur. Anbefalt gjennomsnittlig PPD ligger på $< 10\%$, men det er godtatt en PPD opp til 15% på grunn av at det ikke er installert en luftfukter. Den relative luftfuktigheten er perioder nede i 5% og det antas at antall misfornøyde øker på grunn av dette, men det er ikke gjort tiltak for å øke denne i simuleringen.

Tabell 8.6 viser nøkkelvrdier for ventilasjonsanlegget, samt utregning av luftmengder i de ulike sonene. Det er valgt VAV-ventilasjon i primærområdene med temperatur- og CO_2 -kontroll, og CAV-ventilasjon i sekundærområdene.

Tabell 8.6: Inngangsparametre for ventilasjonssystemet.

Beskrivelse	Enhet	Verdi
Varmegjenvinningsgrad	%	86
SFP	kW/(m ³ /s)	1,5
Set-temperatur tilluft	°C	16/18
Lufttilførsel pr person [15]	m ³ /h·pers	26
Lufttilførsel pga interiør [15]	m ³ /hm ²	2,5
-/ Tillegg for varme og kjøling	m ³ /hm ²	1-5
Tilstedeværelse sekundærområde	%	35
VAV kontroll	-	Temperatur og CO ₂
Beskrivelse	m ² /pers	Utregning [m ³ /hm ²]
Maks VAV- Møterom	5	(26/5)+ 2,5 + 2= 9,7
Maks VAV- Cellekontor	10	(26/10)+ 2,5 + 2= 7,1
Maks VAV- Landskap	8	(26/8)+ 2,5 + 2= 7,8
CAV- spesialrom	15	(26/15+ 2,5) · 0,35+ (2,5 · 0,65)= 3,1
CAV- Trafikk	15	(26/15+ 2,5) · 0,35+ (2,5 · 0,65)= 3,1
Utenfor driftstid	-	2,5

Varmeanlegg

Det er plassert en varmtvannsradiator i hver sone, som er dimensjonert etter maksimalt effektbehov ved ideell oppvarmingsenhet. Tabell 8.7 viser dimensjonert radiatorkapasitet i alle sonene i kontorbygningen. Det kan være ulike behov i like soner fra en etasje til en annen på grunn av varierende areal mot uoppvarmede soner, samt ulike klimatiske forhold avhengig av høyden.

Tabell 8.7: Radiatorkapasitet i hver sone av kontorbygningen.

Sone	Radiatorkapasitet [W]			
	Etasje 1	Etasje 2	Etasje 3	Etasje 4
Cellekontor	3600	2940	2930	4050
Landskap	2600	1960	1950	3120
Møterom	1700	1420	1420	1890
Spesialrom	610	300	300	800
Trafikk	820	530	530	1090

Det er vanlig å legge til 10 % på maksimalt effektbehov for å alltid kunne møte oppvarmingsbehovet. Denne praksisen er utelatt i denne beregningen på grunn av at energiattesten utelater

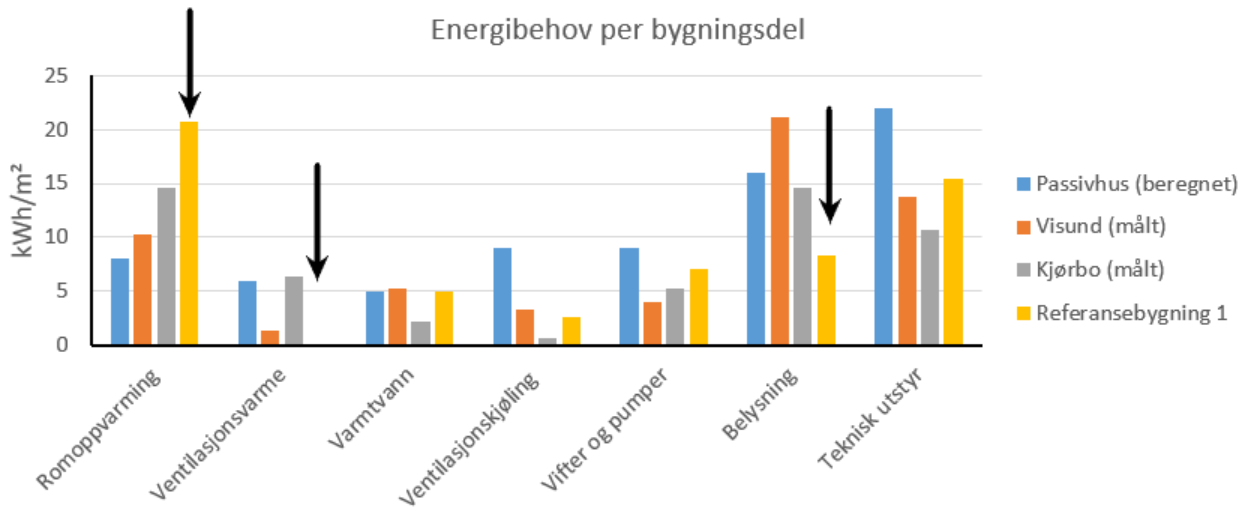
all intern last, som vil dekke mye av varmebehovet i et passivhus. Distribusjonsnettet følger standard innstilling i IDA ICE.

8.3 Analyse av referansebygning

I og med at referansebygningen er basert på passivhusstandarden er det vanskelig å kalibrere modellen opp mot en ekte bygning. En kalibrering forutsetter like forhold i bygningsgeometri og kropp, samt tilgang på energidata og driftsopplysninger. Det eksisterer ikke mange bygninger som passer disse kriteriene. Visund i Haakonsvern kunne vært en aktuell kandidat med tanke på geometri og bygningskropp, men her er det ikke nok tilgjengelige og offentlige energidata og driftsopplysninger.

På en annen side vil det i neste kapittel simuleres en rekke variasjoner innenfor drift og bruk, som er hentet fra ulike kontorbygninger. På denne måten vil et standardavvik inkludere en større andel av ulike kontorbygninger, noe som kan tilsvare en kalibrering med hensyn til flere måter å drifte en kontorbygning på. Videre er det derfor valgt å kalle dette en analyse av referansebygningen, med fokus på bygningsgeometri, bygningskropp og de tekniske anleggene, da en kalibrering stor sett omhandler uventet drift og bruk av en bygning. Det er brukt ulike verktøy for å analysere referansebygningen og sikre at den er representativ for det generelle kontorbygget.

Først er det benyttet ulike eksempler som går innenfor kategorien energieffektiv kontorbygning. I kapittel 3.4 ble det presentert en fordeling av samlet spesifikk energibruk i passivhus basert på beregninger utført av COWI. Det er ikke beskrevet hvordan beregningene er utført, og kilden kan derfor ikke brukes direkte, men den kan gi en pekepinn på forventet fordeling. Det samme gjelder de to bygningene som ble presentert tidligere, Visund[69] og Powerhouse Kjørbo [41]. Bygningene har andre klimaforutsetninger, samt noen ulikheter med tanke på geometri og bygningskropp, men begge representerer energieffektive bygninger, delvis basert på passivhusstandarden. Fordelingen av energibehov til ulike bygningsdeler er presentert i figur 8.3, der gul søyle representerer simulert referansebygning.

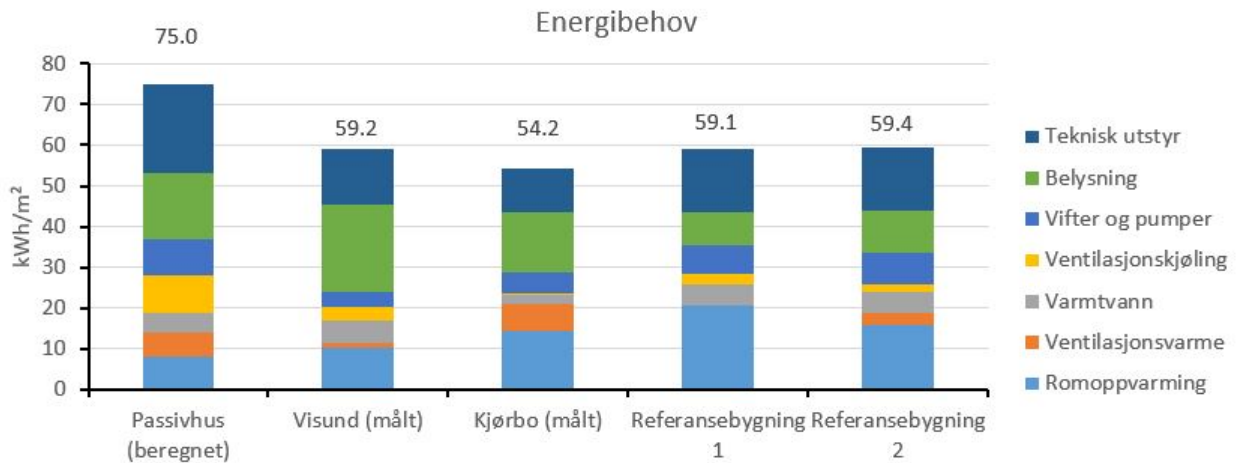


Figur 8.3: Spesifikt energibehov per bygningsdel fra ulike sammenligningsgrunnlag

I figuren kommer det frem at det største forskjellen fra referansebygningen til de representative sammenligningsverdiene ligger i størrelsen på energibehovet til romoppvarming, ventilasjonsvarme og belysning. Behovet til romoppvarming er betydelig høyere i referansebygningen, behovet til ventilasjonsvarme er tilnærmet null, mens behovet til belysning er betydelig lavere. Med bakgrunn i denne informasjonen ble disse parametrene endret:

- Varmegjenvinningsgraden ble redusert fra 86 % til 80 %, som fortsatt er innenfor passivhuskravet
- Setpunkttemperaturen til ventilasjonen ble endret fra utetemperaturkorrigert 16/18°C til konstant 18°C
- Energitettheten til belysning ble endret fra 3,25 W/m² og tilbake til 4 W/m², uten korrigering for dagslys og dynamisk styring.

Figur 8.4 viser resultatet av denne endringen, der energibehovet til ventilasjonsvarme i oransje har økt og energibehovet til romoppvarming i lyseblått er redusert. Det totale energibehovet er tilnærmet det samme, og ligger på høyde med de reelle bygningene Visund og Kjørbo.



Figur 8.4: Samlet spesifikt energibehov fra ulike sammenligningsgrunnlag

I neste trinn må det sikres at alle kravene i passivhusstandard og standarden for inneklimate er fulgt. Her er det en rekke spesifikke verdier innenfor energibehov, varmetap og inneklimateparametre, som må følges opp etter simulering. Tabell 8.8 oppsummerer de viktigste verdiene og eventuelle tiltak for å oppfylle kravene.

Tabell 8.8: Kontroll av krav for en kontorbygning på 2040 m² i Trondheim.

Spesifikk verdi i standard	Referansebygg	Kommentar
Beregnet årlig netto energibehov til oppvarming på < 23,6 kWh/m ²	18,9 kWh/m ²	OK
Varmetapstall for transmisjon og infiltrasjon, $H_{tr,inf} < 0,4$ W/m ² K	0,3 W/m ² K	OK
Minimum gjennomsnittlig luftmengde i driftstid på 6 m ³ /hm ²	6,3 m ³ /hm ²	OK
PPD < 15%	> 15% for cellekontor	+3 m ³ /hm ² maks luftmengde, totalt 10,1 m ³ /hm ²
↔Kommentar utført:	< 15% i alle soner	OK
CO ₂ -konsentrasjon < 400 ppm(ute) +500 ppm	< 740 ppm	OK

På bakgrunn av analysen regnes referansebygningen nå som representativ for det generelle kontorbygget, som er bygd etter passivhusstandard. Denne hovedsimuleringen brukes videre som grunnlag for modellering av variabel drift og bruk, og resultatet skal senere kobles sammen med en matematisk funksjon for aggregering.

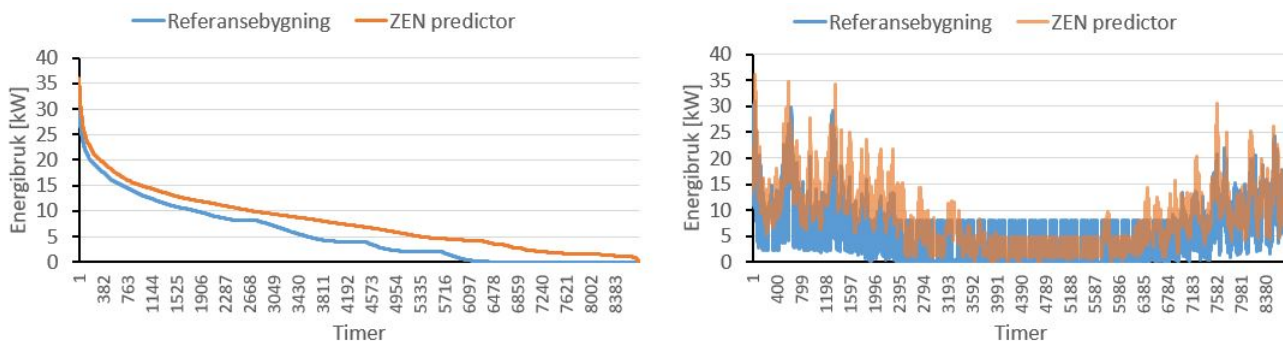
9. Resultater fra referansebygning

Dette kapittelet presenterer resultatene fra referansebygningen, som er basert på et kontormiljø og passivhusstandarden. Resultatene vil bli delt opp i varmebehov og elektrisitetsbehov, og utfallet til grafene vil bli diskutert. Full rapport hentet fra IDA ICE ligger i vedlegg B.

Som nevnt i litteraturstudiet har ZEN utviklet en programvare for å estimere energi- og effektprofiler for ulike bygningstyper. Programvaren er basert på lineær regresjon, værdata og målte energidata. Det som ikke er kjent med denne programvaren er hvor mange bygninger kategorien for energieffektive kontorbygninger er basert på. Det er også ukjent hvilken standard disse bygningene holder, slik at sammenligningen med *ZEN Predictor* ikke kan tolkes direkte. Sammenligningen er likevel tatt med i resultatene fra referansebygningen, for å gi perspektiv og forstå simuleringen bedre.

9.1 Varmebehov

Varmebehovet innebærer romoppvarming, varmebatteri i ventilasjon og oppvarming av tappevann. Figur 9.1 viser varmebehovet til en 2040 m² kontorbygning, der den blå grafen representerer simulert passivhus i IDA ICE, altså referansebygningen, og den oransje grafen representerer en beregnet energieffektiv bygning fra *ZEN Predictor*. Grafene er basert på lik utendørs temperatur, og viser både en varighetskurve og timesverdier. Ut i fra varighetskurven er det tydelig å se at referansebygningen har et lavere varmebehov, og antatt en mer isolert bygningskropp. Timesverdiene bekrefter dette da det er større svingninger i varmebehovet mot lave effekter.



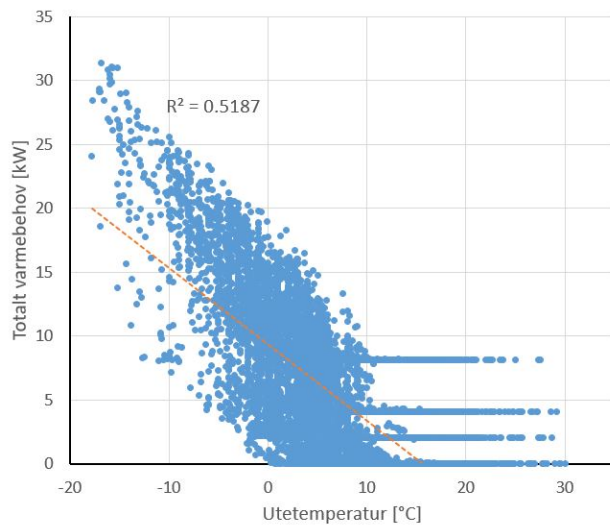
Figur 9.1: Årlig varmebehov for en bygning på 2040 m².

Det er også viktig å legge merke til en grunnlast på rundt 2 kW i *ZEN predictor* -grafene, som fyller de 1000 siste timene i varighetskurven i figur 9.1. Dette er fraværende i referansebygningens

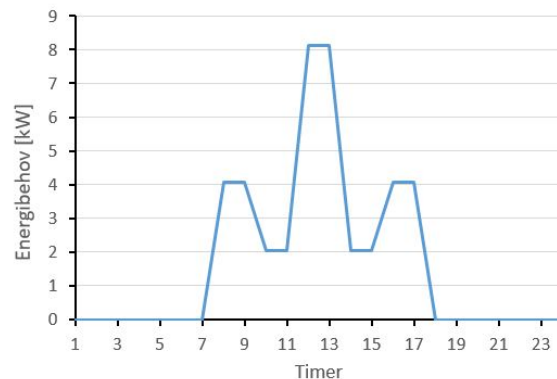
gen og kan for eksempel skyldes en sirkulasjonspumpe med varmetap i varmtvannssystemet, noe som ikke er medberegnet i simuleringen av referansebygningen.

På sommerstid er det kun varmtvannsbehov og timesverdiene avslører at dette behovet er høyere i referansebygningen. Vurderingen av varmtvannsbehov har ikke vært i fokus i denne oppgaven, og det er derfor vanskelig å vurdere hva som er et realistisk resultat. Muligheten for feil varmtvannsbehov er derimot tatt i betraktning når flere bygninger skal simuleres i neste kapittel, ved å legge inn en variasjon med tilnærmet halvvert varmtvannsbehov.

Figur 9.2 viser et spredningsplott fra referansebygningen som forteller at varmebehovet er temperaturavhengig opp til 10 °C. Over denne temperaturen er det kun fire rette linjer på ca 0-, 2-, 4- og 8 kW, som korrelerer med brukerprofilen til varmtvann i figur 9.3.



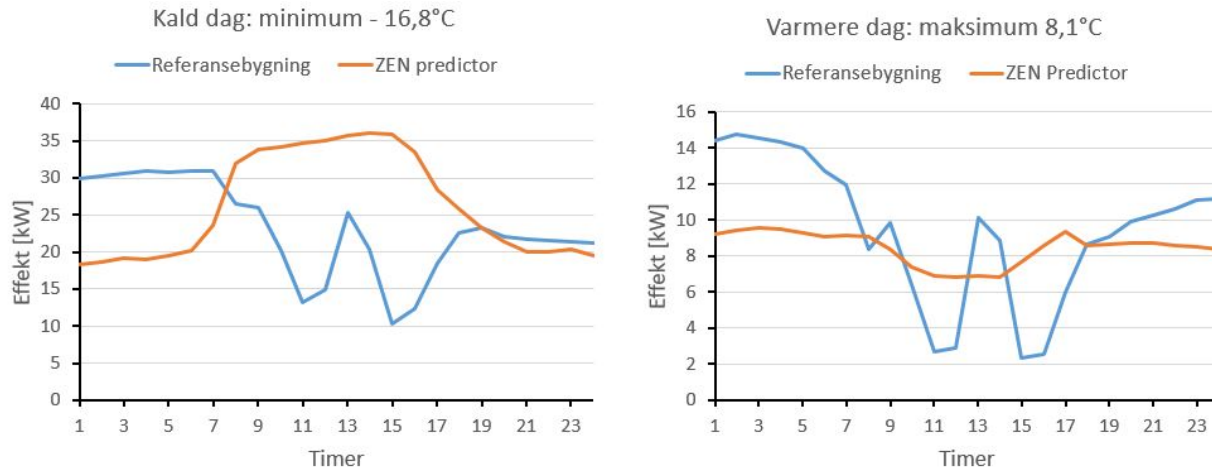
Figur 9.2: Temperaturavhengig spredningsplott



Figur 9.3: Brukerprofil for varmtvann

Den relativt store variasjonen i effekt på like temperaturer i spredningsplottet, antas å være på grunn av den store påvirkningen interne laster har på varmebehovet i denne bygningen. En nærmere titt på to tilfeldige dager, i figur 9.4, viser at varmebehovet går ned på dagtid når mennesker og utstyr avgir varme. En delforklaring på dette kan være at referansebygningen tar vare på de passive varmekildene gjennom en godt isolert bygningskropp, i motsetning til den beregnede ZEN-grafen, eller at hver sone er simulert med ventilasjon og lekkasje i bygningskroppen som eneste luftgjennomstrømning, det er ingen åpne vegger eller dører mellom de ulike sonene.

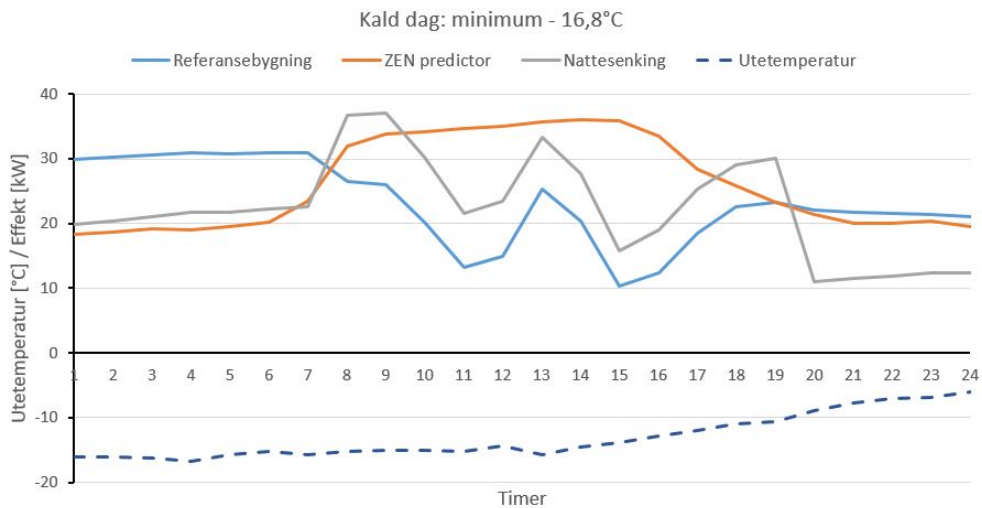
9. Resultater fra referansebygningen



Figur 9.4: Varmebehov på kald og varm dag for referansebygning kontra ZEN Predictor

En annen grunn kan være liten treghet i varmereguleringen i referansebygningen, som fører til store svingninger med bakgrunn i antall mennesker og bruk av teknisk utstyr. En nærmere analyse for å belyse den dynamiske styringen er utført i denne sammenhengen. Det ble forsøkt å endre regulator til radiatorene fra Proporsjonal (P)- til Proporsjonal/Integrasjon (PI)-regulator. Dette gav et lavere varmebehov, men kun en liten forbedring på svingningene i figur 9.4.

Ved å ta en titt på den kalde dagen med installert nattesenking av temperatur, er tendensene mer lik ZEN Predictor, vist i den svarte grafen i figur 9.5. Ut i fra dette antas det at bygningene ZEN Predictor har tatt utgangspunkt i benytter nattesenking av temperatur. Dette er en forskjell fra referansebygningen det er viktig å være klar over.

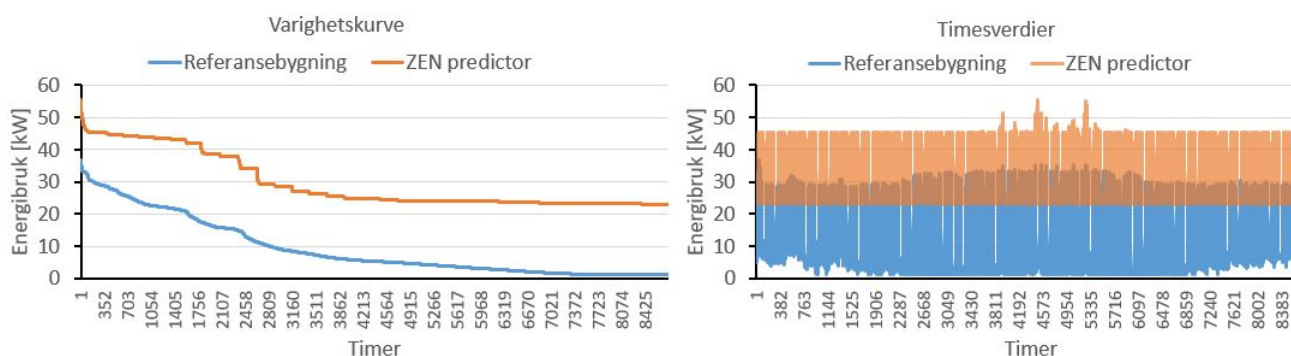


Figur 9.5: Varmebehov på kald dag for referansebygning kontra ZEN Predictor

Til slutt ble det utført en analyse av varmebalansen. Denne avdekket at den mekaniske ventilasjonen står for 70 % av varmetapet i referansebygningen. Kun 17 % av varmetapet fant sted i oppvarmings sesongen, og utgjør 4080 timer i året. Dette tilsier at hovedgrunnen til at varmebehovet går ned i driftstiden er for lav ventilasjonsgrad i forhold til antall mennesker. En mer detaljert drøfting av analysen er presentert i diskusjonen, kapittel 12.2.

9.2 Elektrisitetsbehov

Elektrisitetsbehovet innebærer all direkte elektrisitet til belysning, utstyr, vifter/pumper, samt elektrisitet til energikilde, herunder varmepumpe og elektrisk kjel. Figur 9.6 viser elektrisitetsbehovet til en 2040 m² kontorbygning, der den blå grafen representerer simulert passivhus i IDA ICE, altså referansebygningen, og den oransje grafen representerer en beregnet energieffektiv bygning fra *ZEN Predictor*.

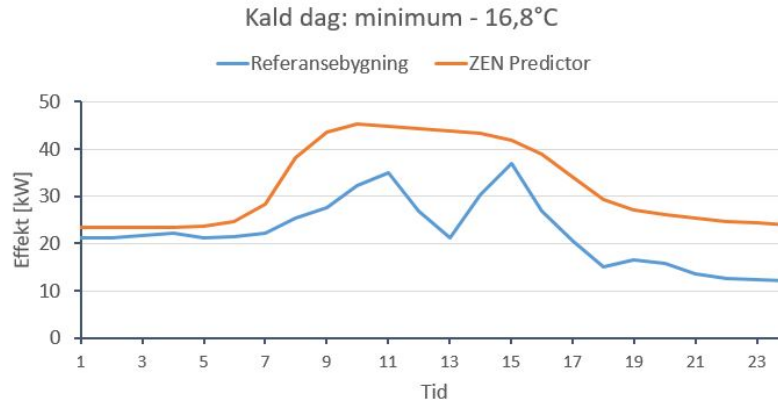


Figur 9.6: Årlig elektrisitetsbehov for en bygning på 2040 m².

Grafene viser noen av de samme tendensene som ved varmebehovet, men i mye større grad. Referansebygningen mangler en grunnlast av elektrisitet som opererer til alle døgnets tider. En delforklaring her kan være fravær av serverrom, som er valgt å utelukke i referansebygningen. Det er uvisst om bygningene i ZEN Predictor har inkludert serverrom eller ikke. Et serverrom vil øke både direkte elektrisitetsbehov og kjølebehov, som kategoriseres under elektrisitet. Simuleringer viser en tendens til redusert varmebehov ved tilføring av en elektrisitetsgrunnlast, men ved serverrom vil dette begrenses til kun et rom.

Figur 9.6 viser en forskjell i elektrisitetsbehov på gjennomsnittlig 20 kW, noe som er mye. Analysen som ble utført under metode, ga derimot ikke uttrykk for en like kraftig feilsimulering, i sammenligning med andre kontorbygninger. Det antas derfor et underdimensjonert elektrisitetsbehov, men ikke i like stor grad som grafen antyder. Skjulte faktorer som kan spille inn på elektrisitetsbehovet er for eksempel virkningsgrad og type energikilde, eller standby-effekt på både utstyr og belysning. Referansebygningen dekkes i stor grad av en varmepumpe, med en

COP-faktor på 4. Figur 9.7 viser elektrisitetsbehovet på tilsvarende kald dag, som varmebehovet. Også her kan man se tendens til kraftig nedgang i lunsjen, som skyldes brukerprofilene hentet fra NS 3031.

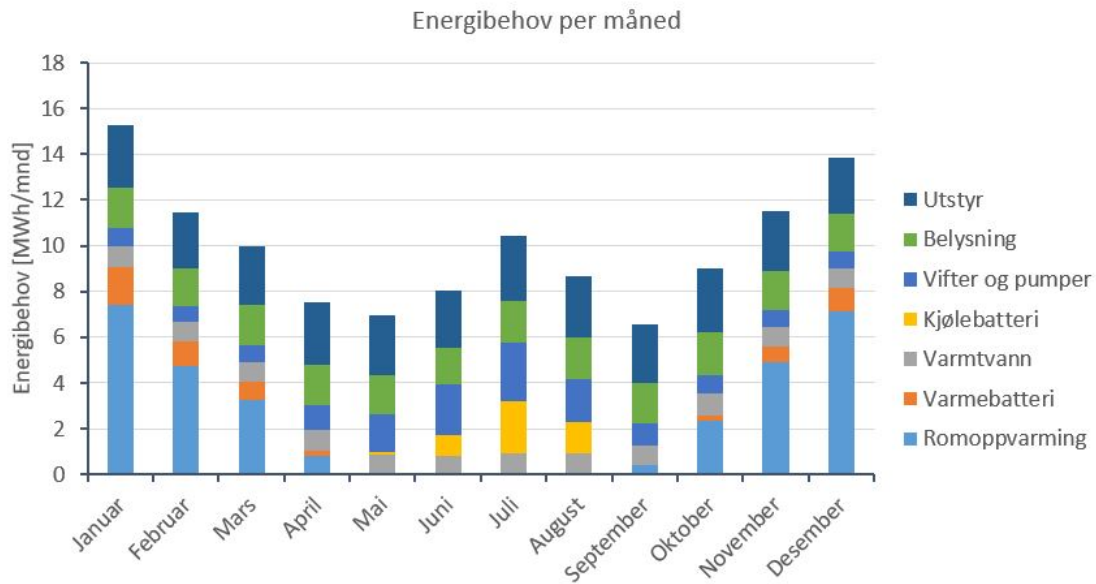


Figur 9.7: Elektrisitetsbehov på en kald dag for referansebygning kontra ZEN Predictor.

Siden referansebygningen følger passivhusstandarden, er det antagelig et større elektrisitetsbehov i praksis, enn det som blir gitt uttrykk for i standarden. På en annen side vil en god termisk dimensjonert bygning ha behov for mindre elektrisitet, og fremtidens bygning vil antagelig ha mer effektivt elektrisk utstyr. I nær fremtid vil derfor elektrisitetsbehovet kanskje være i tråd med simuleringene.

9.3 Oppsummering

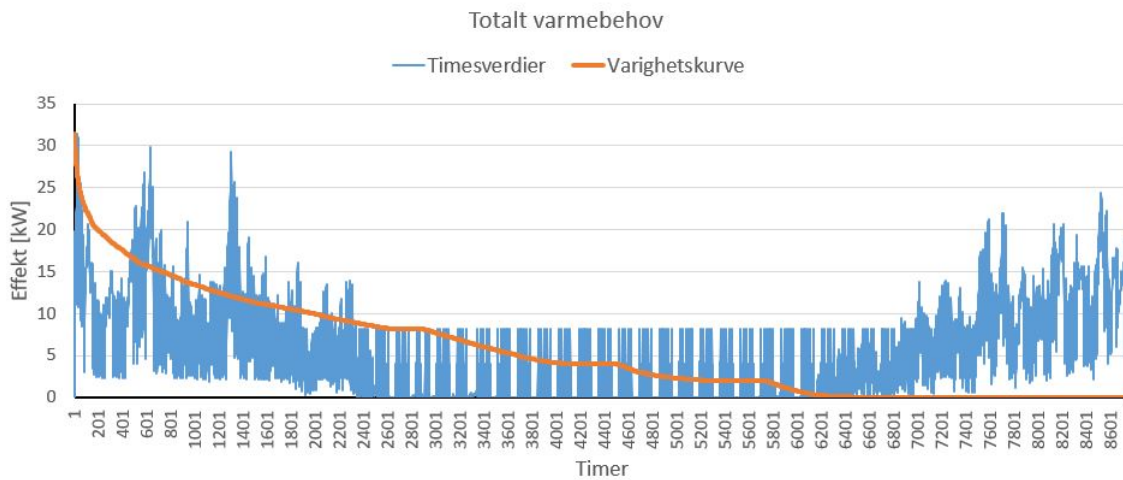
Fordelingen av energibehov per bygningsdel per måned er vist i figur 9.8. Ut i fra de analyserte resultatene er energibehovet til varme realistisk simulert, med unntak av at effektbehovet går ned under driftstiden. Dette skyldes hovedsaklig av lav ventilasjonsmengde i forhold til antall mennesker og dårlig regulering av sensorer og aktuatorer. Energibehovet til elektrisitet er antatt noe underdimensjonert, men er valgt å beholdes med bakgrunn i passivhusstandarden og antatt fremtidig nedgang i elektrisitetsbehov.



Figur 9.8: Månedlig fordeling av energiposter i en bygning på 2040 m².

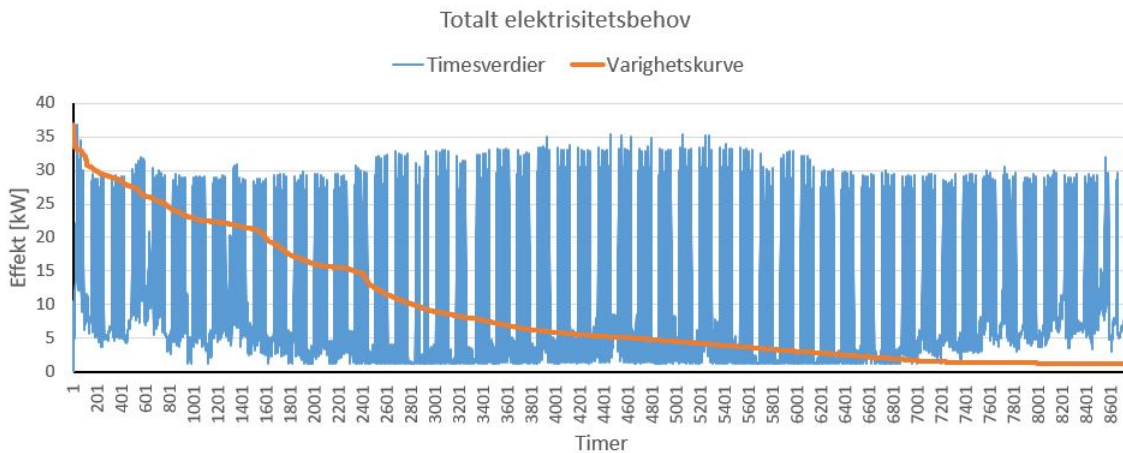
Kapittelet om tekniske systemer nevnte flere aktuelle energikilder for fremtidige kontorbygninger, deriblant solcelle, varmepumpe, fjernvarme og direkte elektrisitet. Ulike investeringskostnader, driftskostnader og virkningsgrader gjør varighetskurven til et svært nyttig hjelpemiddel når valg av energikilde skal bestemmes.

Først kan varmebehovet i bygningen simuleres, uavhengig av energikilde, og varighetskurven etableres som vist i figur 9.9 Sammen med energikostnadene til de ulike energikildene, basert på virkningsgrad, variabel- og fast kostnad, kan type og antall energikilder og bruksområde fastslås. Med tanke på fjernvarme er det også en vurderingssak om anlegget vil koble seg på bygningen eller området, med bakgrunn i hvor mye energi det er behov for.



Figur 9.9: Årsprofil av varmebehovet til referansebygningen.

Deretter kan energikildene innføres i IDA ICE og et mer spesifikk elektrisitetsbehov kan simuleres. Siden valg av energikilde ikke var prioritert i denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i varmepumpe og elektrisk kjel, som ga elektrisitetsbehovet i figur 9.10. Andre typer energikilder kan gi en annen elektrisitetsprofil.



Figur 9.10: Årsprofil av elektrisitetsbehovet til referansebygningen.

10. Metode for utvikling av referansemodell

Den etablerte referansebygningen skal nå utvikles videre ved å innføre variasjoner i drift og bruk. Aktuelle endringer hentes fra litteraturstudien om drift og bruk i kapittel 5, som er basert på forskning, måleverdier, standarder og antagelser gjort av eksperter. Simuleringene analyseres, og ut i fra dette opprettes et standardavvik, som skal kunne benyttes i den statistisk matematiske formelen, Monte Carlo.

Kapittel 7 om energiplanlegging av et større område brukes aktivt når det skal avdekkes en metode for å aggregere energi- og effektprofiler, som skal kombineres med utført bygningssimulering. Det blir presentert ulike fremgangsmåter, før informasjonen oppsummeres og foretrukket metode blir fastslått. Sluttresultatet blir kalt en referansemodell.

10.1 Modellering av variabel drift og bruk

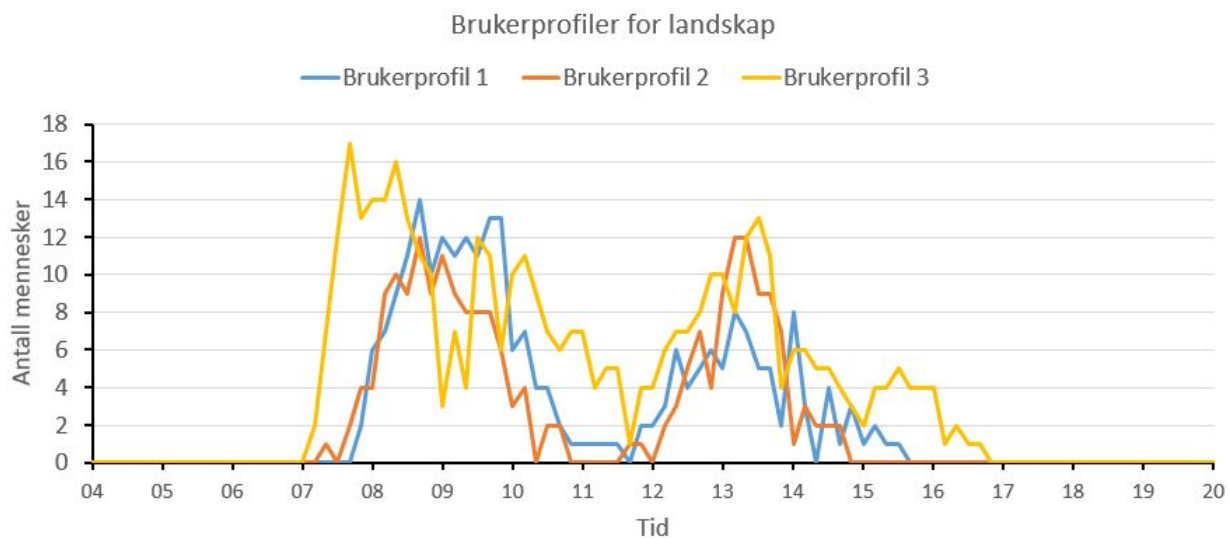
Ved modellering av variabel drift og bruk av en kontorbygning, er metoden delt inn i to deler, og er som følger:

- Brukernes bevegelsesmønster
- Brukernes interaksjon med bygningen

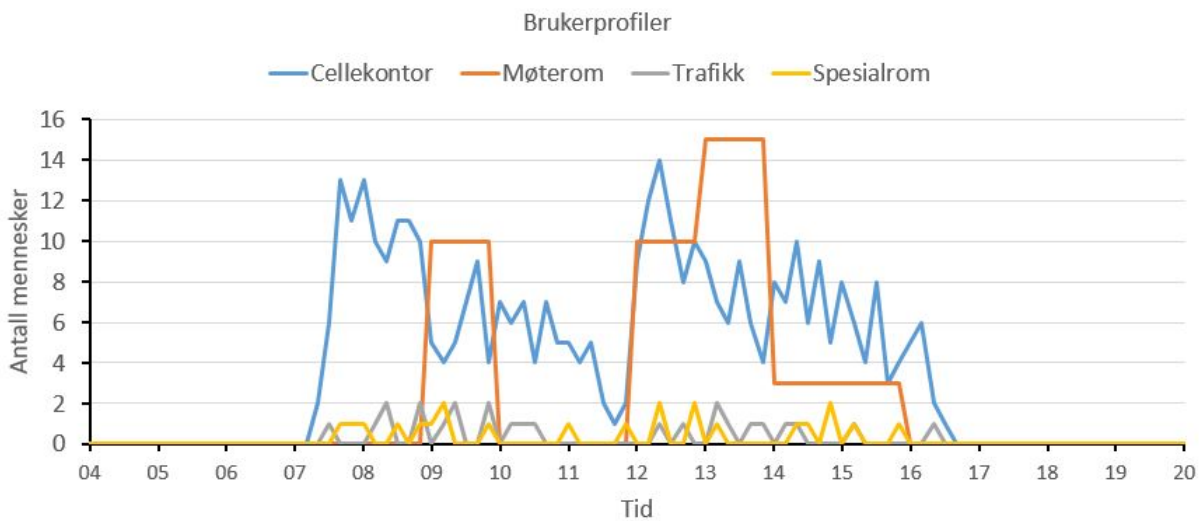
10.1.1 Brukernes bevegelsesmønster

For brukernes bevegelsesmønster er det simulert variasjoner i *Occupancy simulator*, hvor det er forsøkt å implementere generelle parametre med bakgrunn i referansebygningen. Dette vil si tilsvarende soner med ulik mengde mennesker og bevegelse. De innførte parametrene er presentert i vedlegg A. I og med at dette er en stokastisk modell endres bruksmønsteret for hver simulering basert på de samme parametrene.

I dette forsøket ble det lastet ned tre forskjellige brukerprofiler i CSV-format. For å implementere profilene i IDA ICE, ble alle sonene separert i Microsoft Excel og transformert til prn-filer. Deretter ble det mulig å legge inn stokastiske brukerprofiler over ett år, i de ulike sonene. Hele denne prosessen er tidkrevende, og ble derfor kun utført med tre forskjellige CSV-filer. Figur 10.1 viser de tre forskjellige variasjonene en tilfeldig dag i kontorlandskapet i første etasje. Figur 10.2 viser en simulering av resterende soner i første etasje, samme tilfeldige dag.



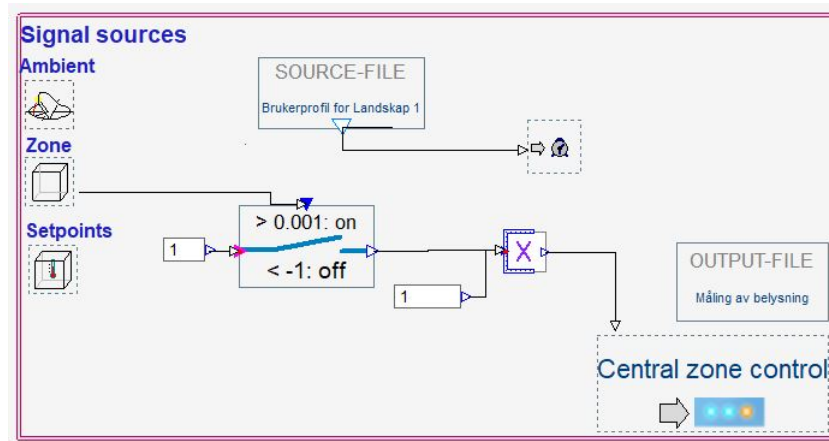
Figur 10.1: Tre stokastiske brukerprofiler for Landskap 1 en tilfeldig dag.



Figur 10.2: Stokastiske brukerprofiler for cellekontor, møterom, trafikk og spesialrom.

10.1.2 Brukernes interaksjon med bygningen

I sammenheng med brukernes bevegelsesmønster kommer kategorien *bruk* av bygningen. Viser tilbake til figur 5.1, hvor bruk av lys, utstyr, varmtvann og åpning av vinduer er koblet til hvert enkelt menneske. På bakgrunn av dette er belysning koblet direkte til tilstedeværelse i sonen, med av/på kontroll. Det er gjort unntak i trafikk-sonen, der lyset står på hele driftstiden fra 07-17. Programmeringen i IDA ICE er vist i figur 10.3.



Figur 10.3: Programmering av egendefinert brukerprofil og av/på lyskontroll.

Når det gjelder bruk av utstyr er dette vanskeligere å koble opp mot tilstedeværelse, da av/påkontroll ikke fungerer i like stor grad. Om det blir 5 personer mindre i sonen, vil de skru av personlig teknisk utstyr, mens resterende fortsatt står på. På bakgrunn av dette ble det bestemt at 75 % av energitettheten innenfor utstyr fortsatt følger den gjennomsnittlige brukerprofilen hentet fra NS 3031, mens 25 % følger den simulerte tilstedeværelsen. Dette for å få mer riktige effekttopper.

Det er utført lite forskning på bruk av varmtvann i kontorbygninger, da energibruken til varmtvann ofte er målt sammen med energi til oppvarming av rom. Av mangel på spesifikk verdi for varmtvannsbruk per person i en kontorbygning, er ikke denne koblet opp mot tilstedeværelse. Det samme gjelder åpning av vinduer, da ikke alle kontorbygninger har denne muligheten.

På en annen side er dette variasjoner som kan legges inn under kategorien *drift* av bygningen. Ut i fra litteraturstudiet og undersøkelse av driftsrapporter fra ulike energieffektive kontorbygninger, er det valgt seks ulike driftsvariasjoner. Hver og en av disse er simulert med de tre forskjellige brukerprofilene, som ble nevnt i forrige delkapittel. Variasjonene er som følger:

1. Mindre varmtvannsforbruk
2. Mulighet for å åpne vinduer
3. Høyere setpunkt-temperatur for oppvarming
4. Lavere setpunkt-temperatur for oppvarming
5. Nattesenking av setpunkt-temperatur for oppvarming
6. Grunnlast på elektrisitet til utstyr og lys

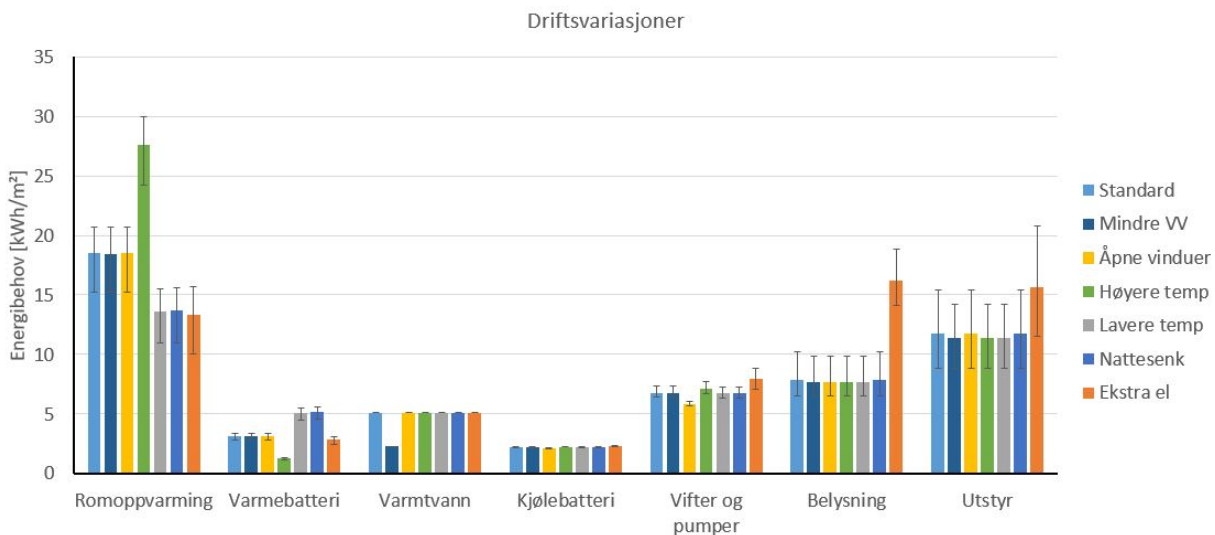
Variasjonene gjør et utslag på det total varme -og elektrisitetsbehovet i større eller mindre grad,

og skal sammen med brukerprofilene gi et innblikk i hvor store forskjeller det kan være i identiske kontorbygninger, kun basert på drift og bruk. Tabell 10.1 viser en mer detaljert beskrivelse over hvilke verdier som er endret på i forhold til hovedsimuleringen, og det er viktig å understreke at det ble utført seks ulike simuleringer med kun én endret parameter i hver. Ideelt skulle simuleringen inneholdt ulike kombinasjoner av de forskjellige parametrene, da de ikke er uavhengige av hverandre, og kan påvirke i positiv og negativ retning. Lang simuleringstid og tidkrevende prosess med å hente ut data begrenset antall simuleringer som ble utført.

Tabell 10.1: Endrede parametre for variasjoner i referansebygningen.

Variasjonsnummer	Beskrivelse	Ny parameter	Parameter i hovedmodell
1	Gjennomsnittlig bruk av varmtvann	2,25 kWh/m ²	5 kWh/m ²
2	Mulighet til å åpne vindu	PI temperaturkontroll på vinduer < 9m ²	Aldri åpen
3	Høyere setpunkttemperatur for oppvarming	22,5°C	21°C
4	Lavere setpunkttemperatur for oppvarming	20°C	21°C
5	Variabel setpunkttemperatur for oppvarming	kl. 06-18: 21°C kl. 18-06: 19°C	21°C
6	Behov for elektrisitet til lys og utstyr utenom driftstid	Lys: 2,1 W/m ² Utstyr: 1,2 W/m ²	0 W/m ²

Figur 10.4 illustrerer hvilken energipost de utførte variasjonene har gitt utslag på, sammenlignet med standardsimuleringen. Avviksstengene på hver søyle viser avvikene basert på simuleringer med ulike brukermønstre. Det er ikke gitt at disse resultatene samsvarer med reelle økninger eller reduksjoner av energibehov på grunn av driftsvariasjoner, og en kalibrering ville redusert usikkerhetene. Dette krever derimot detaljerte energi- og driftsdata. Et eksempel fra *As Built*-rapporten[69] fra Visund kontorbygning beskriver blant annet at en re-simulering av bygningen etter kjente driftsvariasjoner overdimensjonerte varmebehovet som var nødvendig for å holde en høyere set-temperatur på 22,5°C.



Figur 10.4: Spesifikt energibehov for de ulike variasjonene med avvik for bevegesmønster.

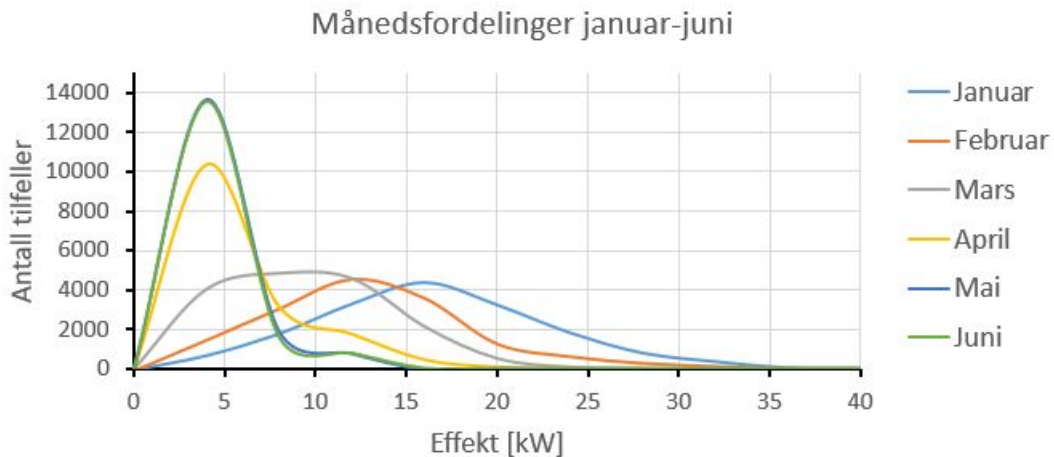
I og med at disse variasjonene ville gitt utslag på hverandre, i tillegg til at det fins mange andre driftsvariasjoner som ikke er tatt med i denne beregningen, vil ikke sju simuleringer med fire brukeravvik være et representativt utvalg. Det er utført en statistisk analyse av tilgjengelige data for å finne ut hvor mye informasjon som kan hentes ut fra simuleringene, dette er beskrevet i neste delkapittel 10.2.

10.2 Analyse av energi- og effektprofiler for variabel drift og bruk

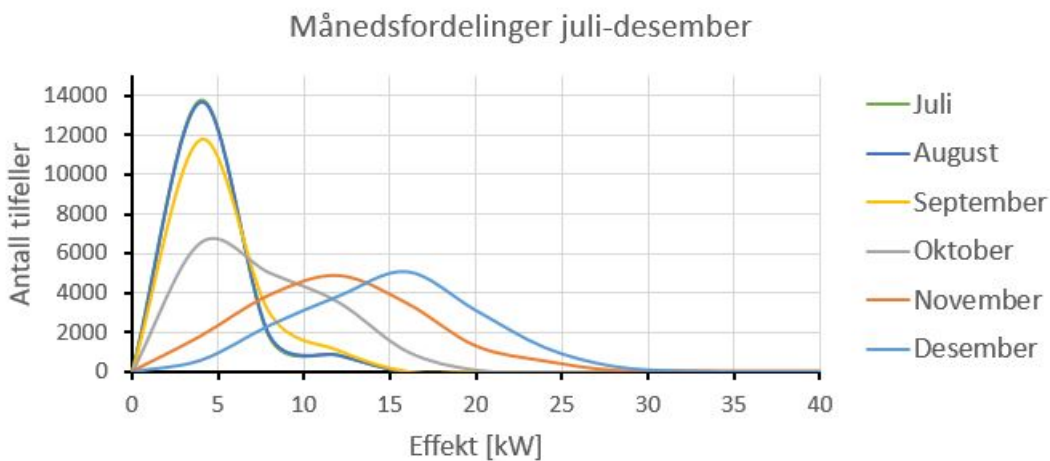
For å opprette en matematisk funksjon som kan erstatte den fysiske simuleringen, er det viktig å analysere dataene og finne ulike sammenhenger i variasjonene. Aktuelle sammenhenger i energidata kan være sesongbasert, brukerbasert eller basert på tidspunkt på døgnet. Analysen deles inn i varmebehov og elektrisitetsbehov, og sammenhenger hentet direkte fra IDA ICE ligger i vedlegg C

10.2.1 Varmebehov

Den sesongbaserte analysen skiller mellom store temperaturavhengige forskjeller da sommer, vinter, vår og høst blir adskilt. For en mer presis sammenheng er analysen delt opp i 12 måneder. Figur 10.5 og 10.6 viser en analyse av alle simulerte effekt-verdier per time i hver måned for 21 bygninger og grafene viser den statistiske fordelingen verdiene følger.



Figur 10.5: Statistisk fordeling av simulerte effekter fra januar til juli.

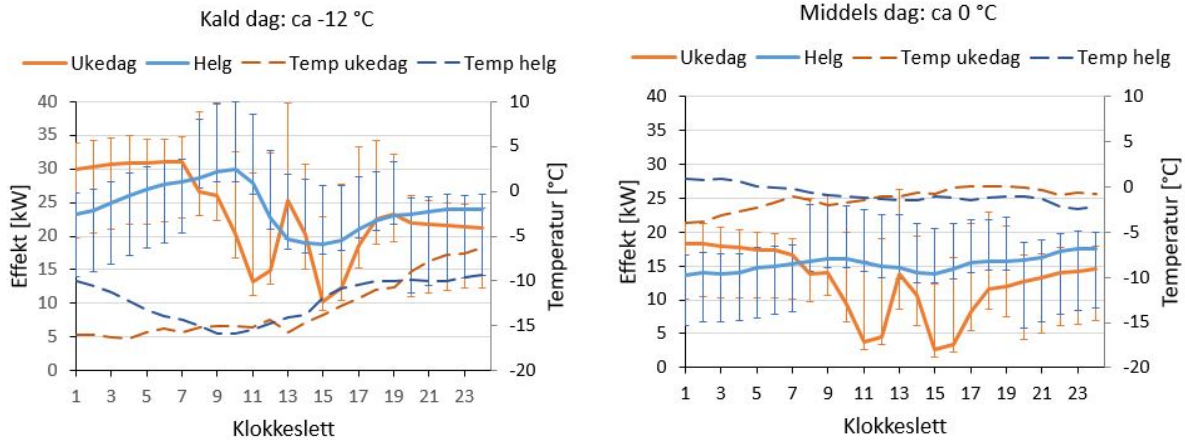


Figur 10.6: Statistisk fordeling av simulerte effekter fra juli til desember.

Som nevnt tidligere forutsetter den valgte Monte Carlo-fremgangsmåten en normalfordeling av datagrunnlaget. Månedene i vinterhalvåret er tilnærmet symmetrisk rundt gjennomsnittet, og har en mellomting mellom trekantfordeling og normalfordeling. Sommermånedene er ikke temperaturavhengig og består stort sett av varmtvannsbehov. Varmtvannsbehovet følger en fast brukerprofil, og vil ikke bli normalfordelt.

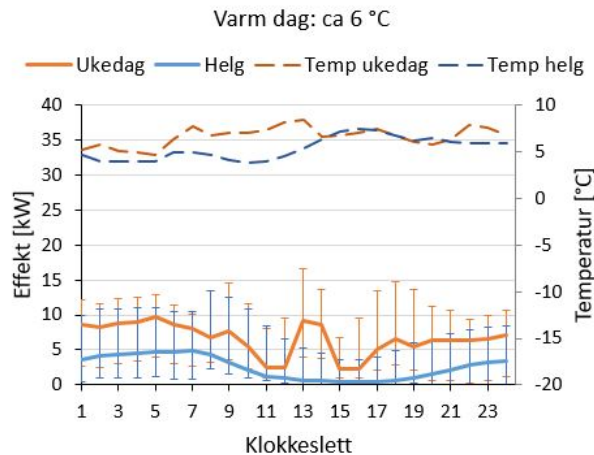
Bruker- og timesbaserte sammenhenger analyseres i figur 10.7- 10.9. Her sammenlignes effektbehovet på dager med ulik temperatur for å se på timesbaserte sammenhenger, og brukerpåvirkningen kommer frem ved å sammenligne helg med ukedag. Temperatur på den varme dagen er satt til 6°C, på grunn av at bygningene ikke har temperaturavhengig varmebehov på utetemperaturer over 10°C, som ble fastslått i forrige kapittel, figur 9.2.

Grafene viser varmebehovet for referansebygningen med avviksstolper for å vise variasjonen ved ulik drift og bruk. Det er også lagt ved temperaturgrafer slik at man lettere kan skille mellom temperaturpåvirkning og brukerpåvirkning.



Figur 10.7: Effekt med varians en typisk kald dag.

Figur 10.8: Effekt med varians en middels dag.



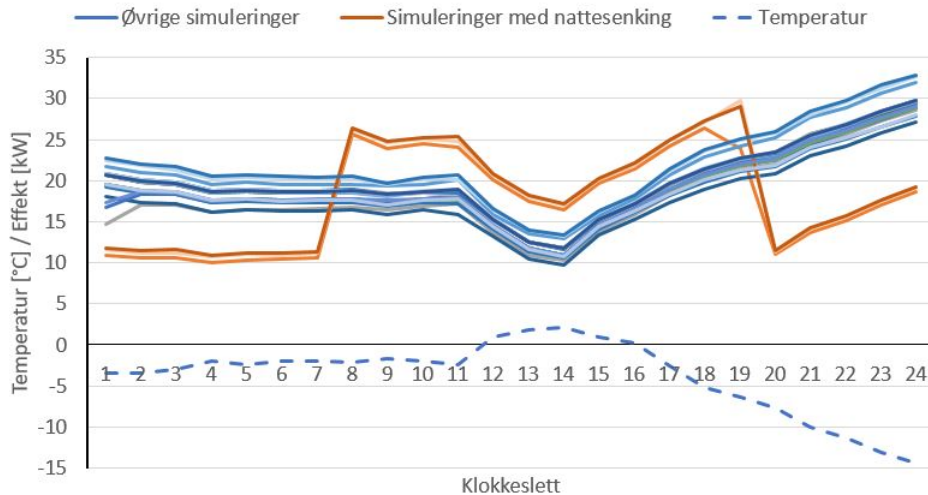
Figur 10.9: Effekt med varians en varm dag.

Det er en korrelasjon mellom varmebehovet på de ulike dagene, med synkende behov ved varmere temperaturer. Avviksstolpene, altså variasjonen i drift og bruk, avtar også med stigende temperatur, som indikerer at driftsforskjeller og temperatur er avhengige av hverandre.

Ved å ta en nærmere titt på en tilfeldig dag som ikke er påvirket av brukere, kan man skille ut og analysere driftspåvirkningen. Dette er vist i figur 10.10, hvor temperaturgrafene også er inkludert. De blå grafene følger det samme mønsteret med omtrent 5 kW i forskjell, mens de røde grafene har en reduksjon i effektbehov utenfor driftstid. Dette er på grunn av nattesenking

av temperatur fra 21°C til 19°C, og avviket blir dermed ulikt over og under referanseverdien etter tid på døgnet.

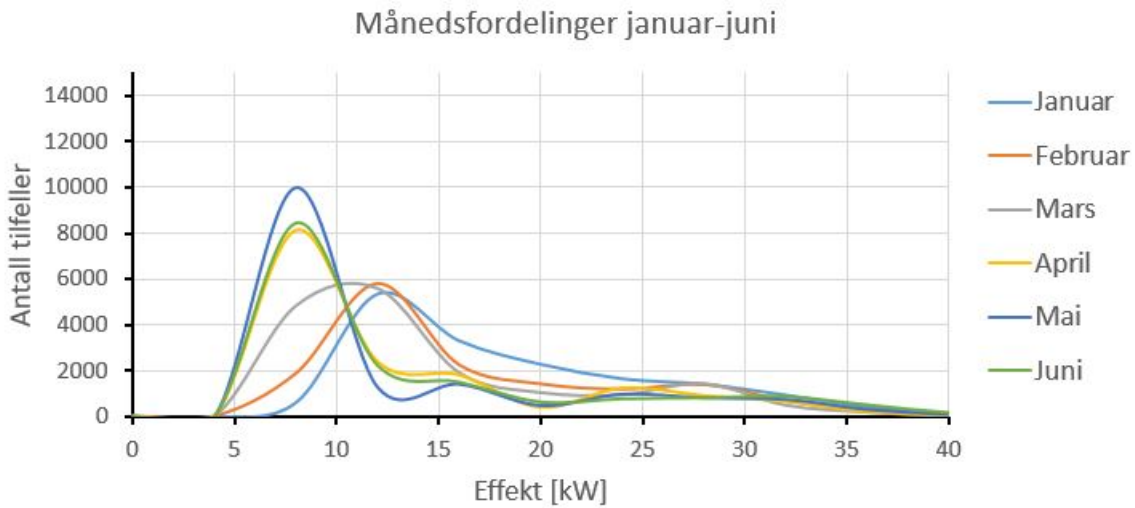
Når det senere skal lages et standardavvik til Monte Carlo-simuleringen, må man derfor benytte en gjennomsnittsverdi av alle bygningene, istedet for verdiene til selve referansebygningen. Dette er på grunn av at det ikke er mulig med forskjellig positivt og negativt avvik i Monte Carlo-formelen.



Figur 10.10: Eksempel på varmebehov for ulike driftsvariasjoner utenfor driftstid.

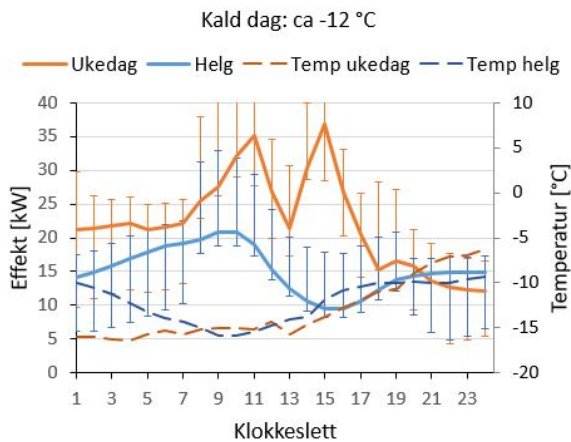
10.2.2 Elektrisitetsbehov

Den samme analysen er utført for elektrisitetsbehovet, som følger mange av de samme trendene som varmebehovet. Den sesongavhengige analysen i figur 10.11 viser fordelingen for januar til juli, hvor det er overvekt av høye effekter kontra lave effekter. Elektrisitetsbehovet er ikke like temperaturavhengig som varmebehovet og er delvis av grunnen til en fraværende normalfordeling. Dette er viktig å merke seg når man skal etablere en metode for aggregering av energi- og effektprofiler.

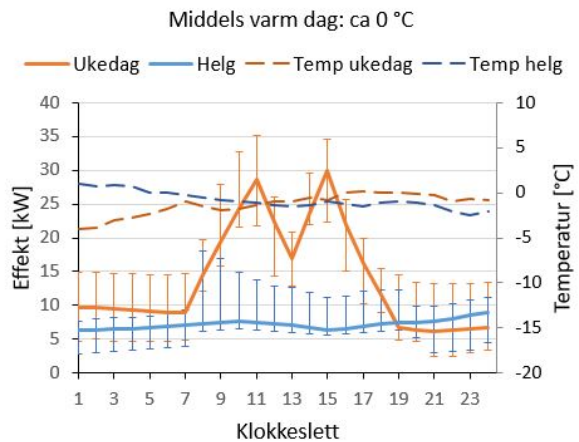


Figur 10.11: Statistisk fordeling av simulerte effekter fra januar til juli.

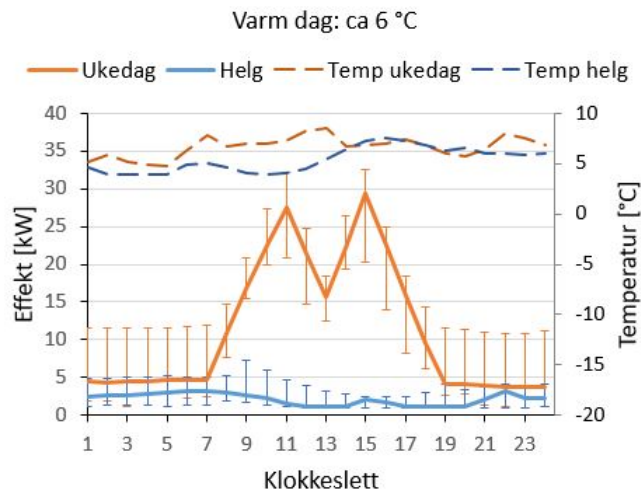
Dagsprofilene i figur 10.12- 10.14 viser at elektrisitetsbehovet er temperaturavhengig, med forskjeller på ca 15 kW utenfor driftstid. På en annen side blir dette overskygget av brukerpåvirkningen i driftstiden, som kun varierer i underkant av 10 kW fra kald dag til varm dag.



Figur 10.12: Effekt med varians en typisk kald dag.

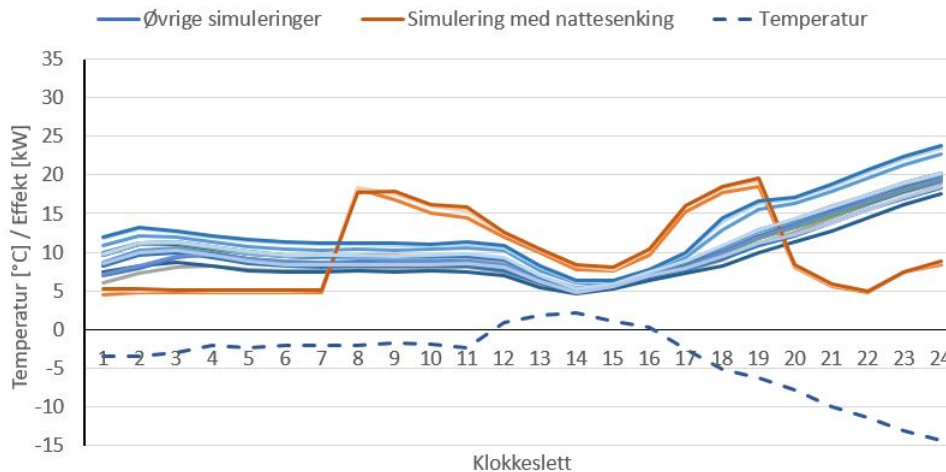


Figur 10.13: Effekt med varians en middels dag.



Figur 10.14: Effekt med varians en varm dag.

Avviksstolpene viser en tydelig driftsvariasjon tilsvarende varmebehovet, som avtar med stigende temperatur. Figur 10.15 bekrefter at elektrisitetsbehovet må benytte gjennomsnittsverdi ved beregning av Monte Carlo, i likhet med varmebehovet.



Figur 10.15: Elektrisitetsbehov for nattesenking av temperatur kontra andre simuleringer

10.3 Modell for energi- og effektprofiler på områdenivå

Med kunnskap om hvordan energibruken varierer med drift og bruk, kan det utvikles en matematisk modell som fanger opp tilsvarende variasjoner. Den valgte matematiske modellen kalles Monte Carlo (MC)- simulering, som forklart tidligere i oppgaven.

Med bakgrunn i litteraturstudiet ble det valgt å ta utgangspunkt i en MC-simulering basert på en

statistisk normalfordeling. Dette ble vurdert til den mest egnede fordelingen. Det er imidlertid ulike måter å utføre MC-simuleringen på. Dette kapittelet vil sammenligne tre forskjellige måter å tilføre en stokastisk variabel, hvor den som korrelerer best med simuleringene i IDA ICE blir brukt videre i resultatene.

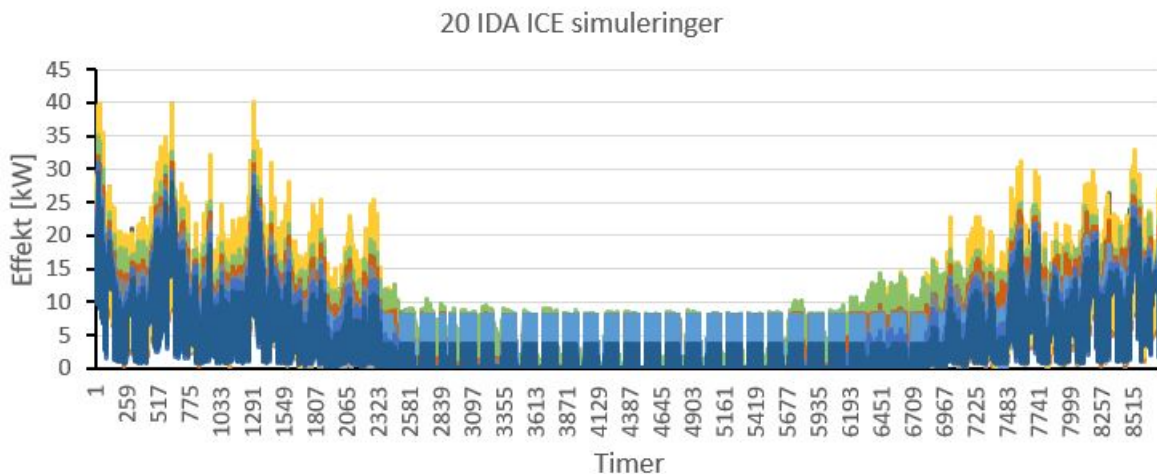
MC-simuleringen blir utført med Excel-formelen som ble bekrevet i kapittel 7.2, og gjentatt i ligning 10.1. Forskjellen på de ulike fremgangsmåtene ligger i hvilken sannsynlighet som benyttes. Formelen RAND(), som vil si et tilfeldig nummer mellom 0 og 1 benyttes på alle, men det er ulik grad av tilfeldighet, og denne forklares i de respektive delkapitlene nedenfor.

$$= NORM.INV(Sannsynlighet; Gjennomsnitt(\mu); Standardavvik(\sigma)) \quad (10.1)$$

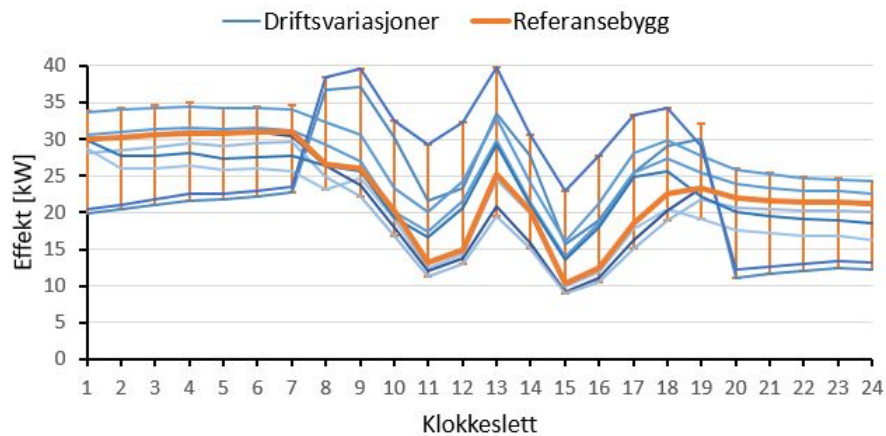
For enkelhetens skyld tas det utgangspunkt i 20 simulerte driftsvariasjoner fra IDA ICE, som skal sammenlignes med 20 MC-simuleringer, med tre forskjellige metoder. Metodene vil bli presentert som Monte Carlo-metode 1, 2 og 3, med forkortelsene MC 1, MC 2 og MC 3. Metodene tar kun utgangspunkt i varmebehovet, men tilsvarende er utført for elektrisitetsbehovet og blir oppsummert i delkapittel 10.3.6. Metodene diskuteres med bakgrunn i presenterte grafer.

10.3.1 Driftsvariasjoner fra IDA ICE

Figur 10.16 og 10.17 viser drift- og brukervariasjonene som er simulert i IDA ICE, og utgjør grunnlaget til de tre påfølgende MC-metodene. Felles gjennomsnittsverdier og standardavvik er hentet fra disse simuleringene.



Figur 10.16: Simulerte årsprofiler av referansebygning med variasjoner fra IDA ICE.



Figur 10.17: Simulerte dagsprofiler av referansebygning med variasjoner fra IDA ICE.

De videre delkapitlene presenterer tilsvarende figurer, en med årssimuleringer og en med dagsbehov samme tilfeldige dag. Figurene med dagsbehov viser behovet til referansebygningen i oransje, med tilhørende avviksstolper for driftsvariasjoner, og 10 ulike MC-simuleringer i blått. Figurene viser kun 10 MC-simuleringer for å lettere kunne se sammenhenger med IDA ICE-simuleringene.

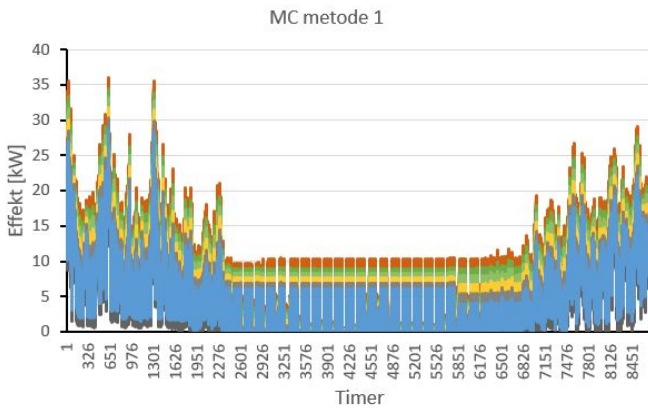
10.3.2 Monte Carlo- metode 1 med konstant sannsynlighet

Metode 1 benytter den samme tilfeldige verdien i alle timesverdiene i løpet av året. Det vil si, hvis $A1 = RAND() = 0,8$ for den aktuelle bygningen, vil sannsynlighetsverdien 0,8 gjelde for alle timesverdiene, med kun variasjon i gjennomsnittsverdi og standardavvik. Formelen i Microsoft Excel er vist i ligning 10.2.

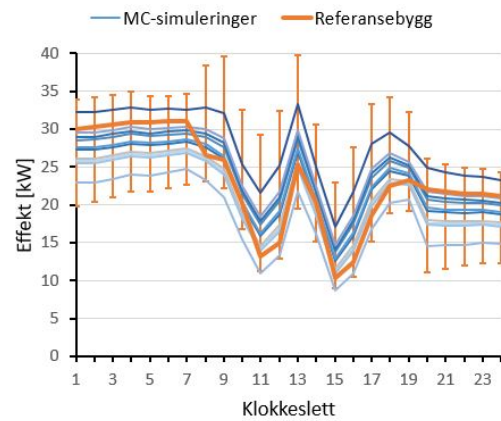
$$A1 = RAND()$$

$$B1 : B8760 = NORM.INV(\$A\$1; \mu ; \sigma) \quad (10.2)$$

Timesverdier over ett år fra 20 bygninger simulert med metode 1 er vist i figur 10.18, og 10 MC-simuleringer fra en tilfeldig dag er vist i figur 10.19.



Figur 10.18: 20 årsprofiler med bruk av MC 1.



Figur 10.19: 10 dagsprofiler med MC 1.

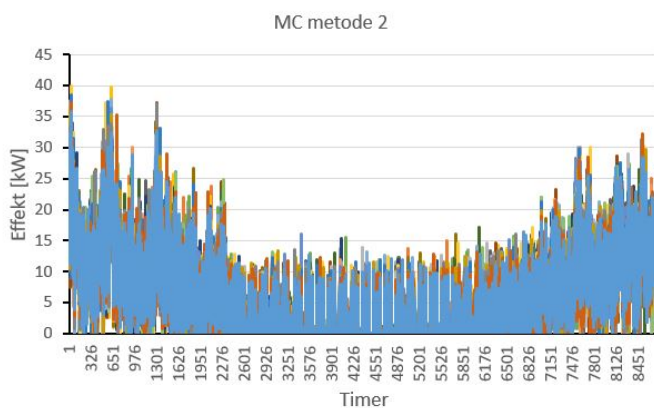
Ved bruk av denne metoden vil alle bygningene følge samme mønster, med en prosentandel høyere eller lavere effekter, som kommer tydelig frem i figur 10.19. Effekttoppene vil dermed finne sted på akkurat de samme tidspunktene, noe som ikke er realistisk eller ønskelig.

10.3.3 Monte Carlo- metode 2 med variabel sannsynlighet

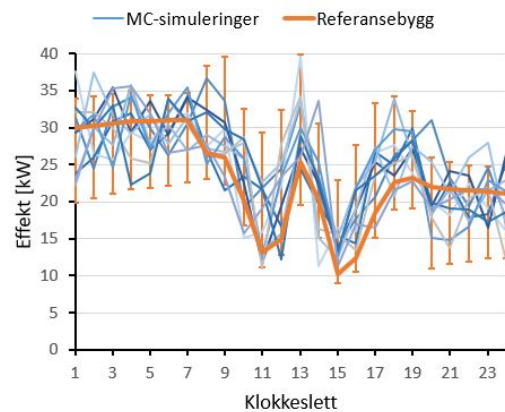
Metode 2 benytter ny tilfeldig verdi for hver time iløpet av et år. Det vil si at både sannsynligheten, gjennomsnittsverdien og standardavviket varierer for hver time. Formelen i Microsoft Excel er vist i ligning 10.3.

$$B1 : B8760 = NORM.INV(RAND(); \mu ; \sigma) \quad (10.3)$$

Timesverdier over ett år fra 20 bygninger simulert med metode 2 er vist i figur 10.20, og 10 simuleringer fra en tilfeldig dag er vist i figur 10.21.

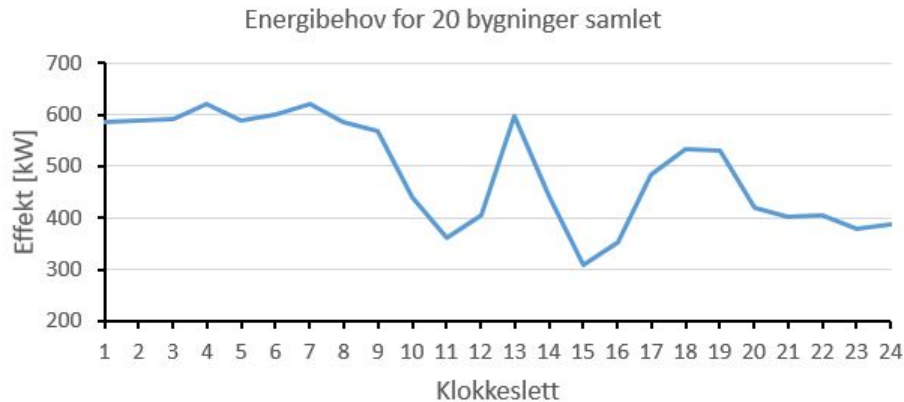


Figur 10.20: 20 årsprofiler med bruk av MC 2.



Figur 10.21: 10 dagsprofiler med MC 2.

Ved bruk av denne metoden varierer timesverdiene fritt innenfor standardavviket, uten stor korrelasjon til forrige verdi. Dette fører til svært mange svingninger i effektbehovet, selv utenfor driftstid når det i utgangspunktet er ganske stabilt. Sett alene er denne metoden svært urealistisk, men lagt sammen til et stort område blir det en utjevning i effektbehovet, som vist i figur 10.22.



Figur 10.22: Totalt aggregert varmebehov for 20 bygninger en tilfeldig dag.

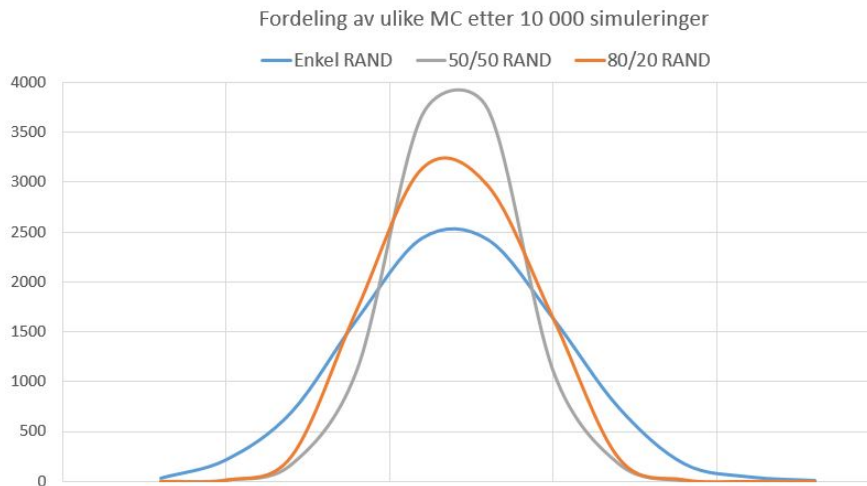
10.3.4 Monte Carlo- metode 3 med blandet sannsynlighet

Siden de to presenterte MC-metodene gir utslag til hver sin kant i forhold til ønsket utfall, utforskes det muligheter for å kombinere de to løsningene. En mulighet er at en prosentandel følger metode 1 og en prosentandel følger metode 2, som vist i formel 10.4.

$$A1 = RAND()$$

$$B1 : B8760 = NORM.INV((A1 * 0.8 + RAND() * 0.2); \mu ; \sigma) \quad (10.4)$$

Det er derimot ikke mulig uten at det går på bekostning av normalfordelingen. Figur 10.23 viser et eksempel på hvordan fordelingen endrer seg fra metode 1 og 2 med *enkel RAND*, til ulik prosentfordeling med *50/50 RAND* og *80/20 RAND*. Fordelingene blir svært konsentrert på midten, og de fleste verdiene vil dermed ligge tett ved gjennomsnittet, noe som ikke er ønskelig.



Figur 10.23: Statistisk fordeling ved bruk av ulike MC-metoder.

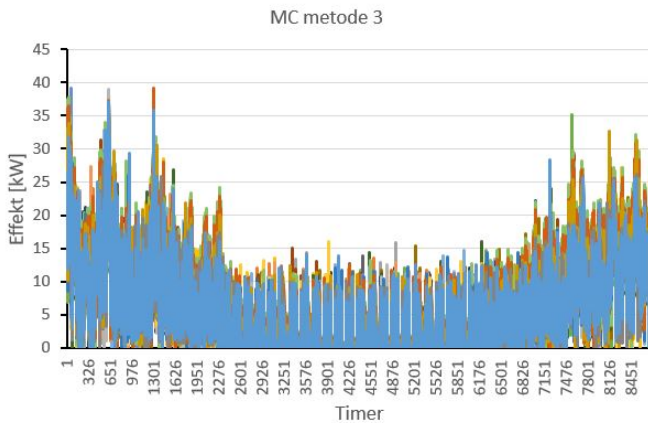
Analysen av energi- og effektprofiler for variabel drift og bruk fastslo gjennom figurene 10.7 til 10.9 hvor store variasjoner kun menneskelig bevegelse utgjør i- og utenfor driftstiden. En målt variasjon på opptil 30 % tilsier at det vil oppstå større avvik og svingninger i driftstiden på grunn av bevegelser i bygningen.

På bakgrunn av dette ble det besluttet å benytte metode 1 utenfor driftstid, med lite svingninger, og metode 2 i driftstiden, som er mer uforutsigbart med tanke på mennesker. Fremgangsmåte i Excel er vist i ligning 10.5.

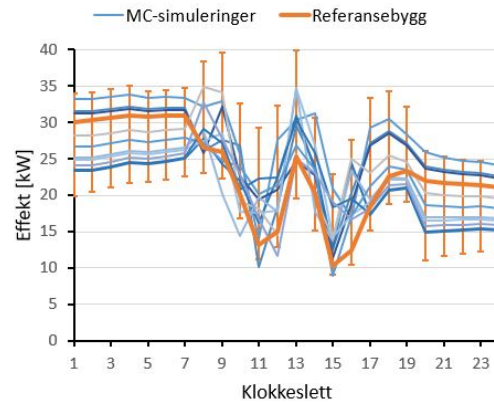
$$A1 : A8760 = \text{Klokkeslett} (1 - 24)$$

$$B1 : B8760 = IF(AND(A1 > 7; A1 < 17); \text{Metode 2}; \text{Metode 1}) \quad (10.5)$$

Enkelt forklart betyr formelen: Hvis klokkeslettet er mellom 7 og 17 benyttes metode 2, ellers benyttes metode 1. Årsprofil og dagsprofil for metode 3 er vist i figur 10.24 og 10.25.



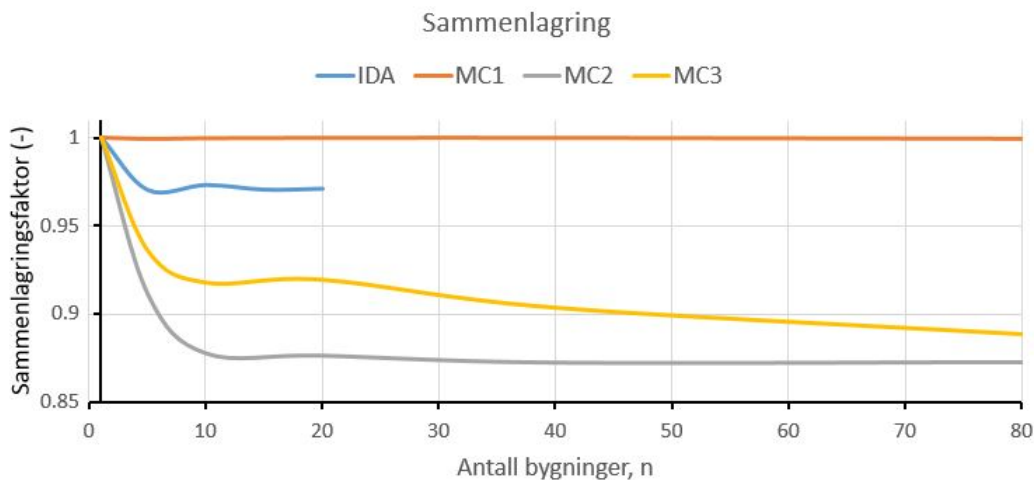
Figur 10.24: 20 årsprofiler med bruk av MC 3.



Figur 10.25: 10 dagsprofiler med MC 3.

10.3.5 Oppsummering av profil for varmebehov

For å oppsummere og sammenligne metodene er det laget en graf som viser sammenlagningsfaktoren til de forskjellige metodene i figur 10.26. Den blå grafen av de 20 simuleringene i IDA ICE viser grunnlaget for MC-simuleringene, og har en sammenlagring på ca 0,97. Som nevnt i kapittel 7.2, vil sammenlagingen i like bygningstyper ofte ligge nærmere 1, siden det er begrenset med brukervariasjoner. Det er et begrenset antall simuleringer tilgjengelig for å fastsette brukervariasjonen, og en matematisk formel som Monte Carlo hjelper til med å skape mer mangfold i resultatene, og dermed en lavere sammenlagningsfaktor.

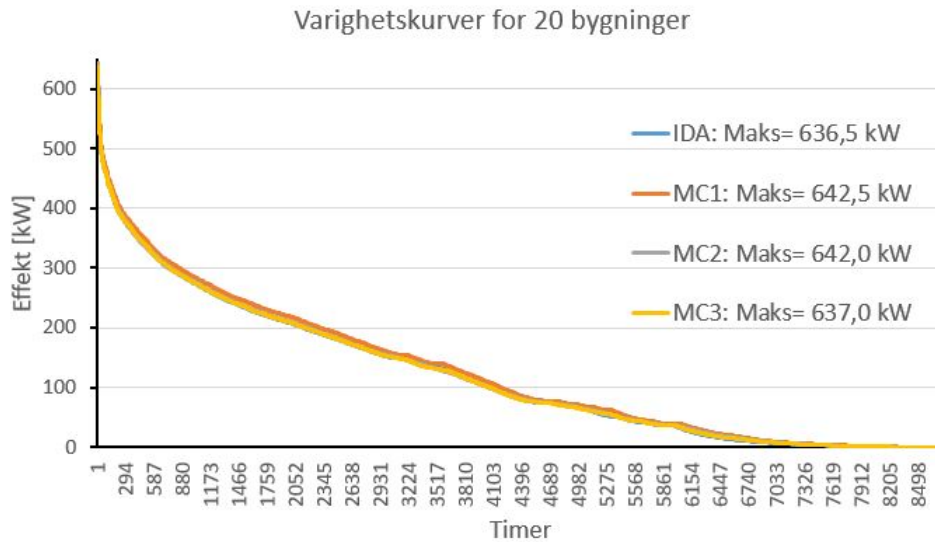


Figur 10.26: Beregning av sammenlagningsfaktor ved økende antall aggregerte bygninger.

Sammenlagningsfaktoren til metode 2 er den beste, men for å tilfredsstille kravet om flyt utenfor driftstid, måtte denne vike for en svakere faktor i metode 3. På en annen side viser trenden at

MC 2 og MC 3 sammenfaller bedre jo flere bygninger som er med i beregningen.

Det er også laget varighetskurver for å bekrefte at energibehovet til bygningene fortsatt er omtrentlig likt, selv om bygningene og metodene opererer med forskjellig samtidighet.



Figur 10.27: Varighetskurver for varmebehovet med de ulike MC-metodene.

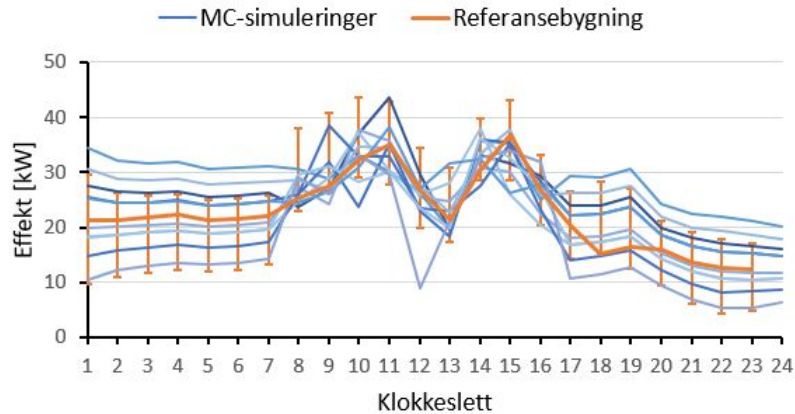
For å oppsummere metoden for aggregering av varmebehov, vil analysen av de simulerte energi- og effektprofilene for variabel drift og bruk i delkapittel 10.2, bli sett på sammen med valg av matematisk modell i dette kapittelet.

Månedsfordelingene i figur 10.5 og 10.6 viser en tilnærmet normalfordeling på vinterstid og fraværende normalfordeling på sommerstid. Dette kommer frem ved sammenligning av årsprofilen til referansebygningene i figur 10.16 og årsprofilen til MC3 i figur 10.24, der vinterhalvåret ligger godt dimensjonert rundt gjennomsnittet mens sommermånedene er overdimensjonert i forhold til gjennomsnittet. Dette kan være på grunn av at den matematiske modellen er basert på normalfordeling.

Ideelt sett ville det vært best å endre MC-fordeling basert på sesong, men med vanlig Microsoft Excel er ikke selvdefinert fordeling mulig. Dette krever tilleggsprogrammer og metoden blir fort mer avansert. Sett bort fra dette er simuleringen av varmebehov pålitelig på vinterhalvåret hvor store deler av varmebehovet ligger. Med en sammenlagring ned mot 0,88 anses metode MC3 som en god metode for aggregering av bygninger, som gir mangfold i resultatene.

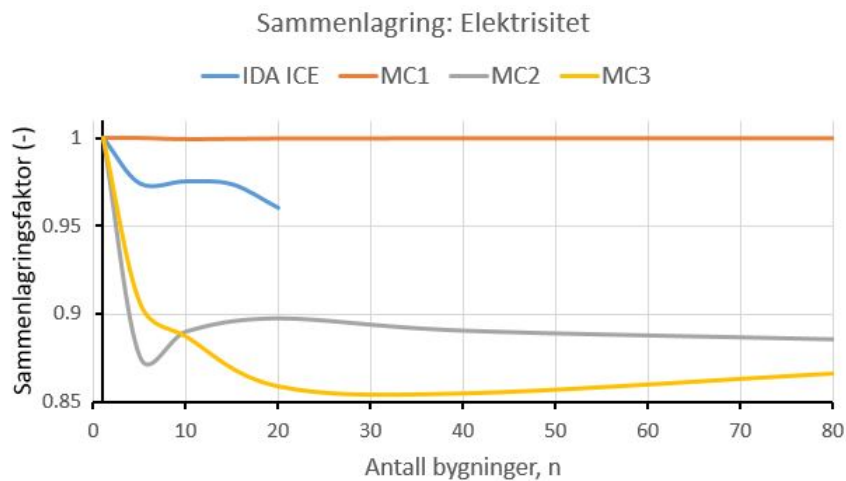
10.3.6 Oppsummering av profil for elektrisitetsbehov

Når det gjelder elektrisitetsbehovet er den samme analysen gjort i forhold til ulike MC-metoder. Forholdene tatt i betraktning ble det valgt å benytte MC 3 for elektrisitetsbehovet også, med dagssimuleringer som vist i figur 10.28.



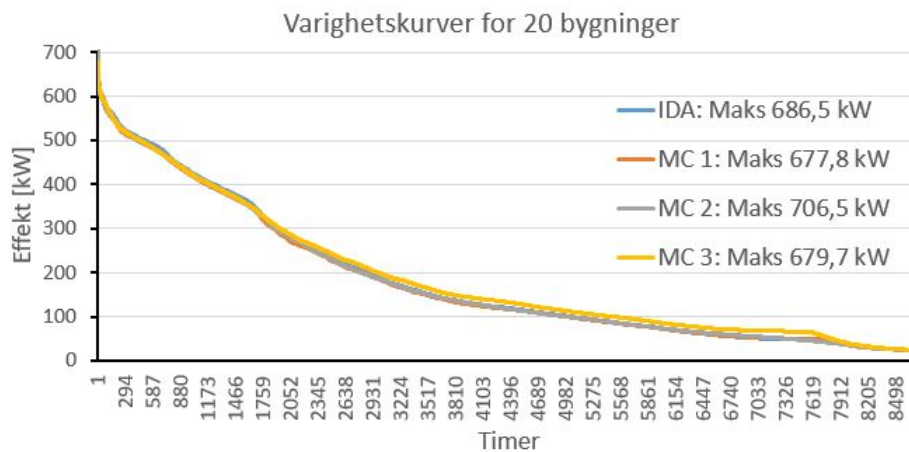
Figur 10.28: Utvalg av 10 dagsprofiler fra MC 3 sammenlignet med referansebygning.

Figur 10.29 viser sammenlagringen til de ulike metodene, og til forskjell fra varmebehovet er sammenlagringen til MC 3 den laveste. Sammenlagringsfaktoren går ned mot 0,85 ved 30 bygninger, med en bratt kurve fra en bygning til fem bygninger. Dette er på grunn av at de største variasjonene skjer innenfor driftstid, og har derfor et begrenset område for samtidighet mellom bygningene.



Figur 10.29: Beregning av sammenlagringsfaktor for elektrisitet med ulike MC-metoder.

Varighetskurvene til alle metodene er vist i figur 10.30, med liten variasjon i mengde elektrisitet.



Figur 10.30: Varighetskurver for elektrisitetsbehovet med de ulike MC-metodene

Siden verdiene gjennomsnittet og standardavviket er basert på ikke er normalfordelt, fører dette til at en MC-simulering ikke er i stand til å produsere de høye og lave avvikene, som ble simulert i IDA ICE. Fordelingen i figur 10.11 viser at alle månedene har et stort avvik mot høye effekter, som fører til en forflyttet normalfordeling og gjennomsnittet blir noe høyere enn det ekte gjennomsnittet.

Dette kan derimot unngås ved et standardavvik som er basert på flere simuleringer, samt et bredere spekter av brukervariasjoner innenfor lys og utstyr. Uavhengig av dette gir metoden en god sammenlagring og mangfold i de simulerte bygningene.

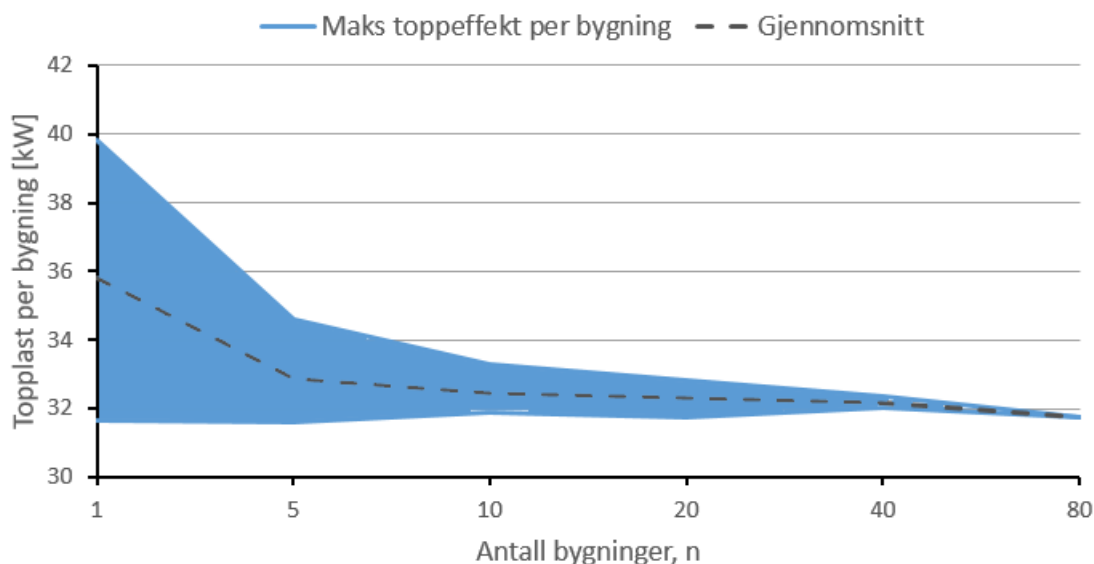
11. Resultater fra aggregert modell av flere kontorbygninger

Dette kapittelet presenterer resultater fra referansemodellen og er delt opp i varme- og elektrisitetsbehov, med en oppsummering av metoden til slutt.

Fremstillingen av resultatene tilsvarer figur 7.1 av Igor Sartori i kapittel 7 om energiplanlegging av større områder, der toppeffektene for 200 energieffektive boliger presenteres med økende mengde aggregerte bygninger. Resultatet for denne masteroppgaven er spesifisert for kontorbygninger på passivhusnivå, med et område på 80 bygninger.

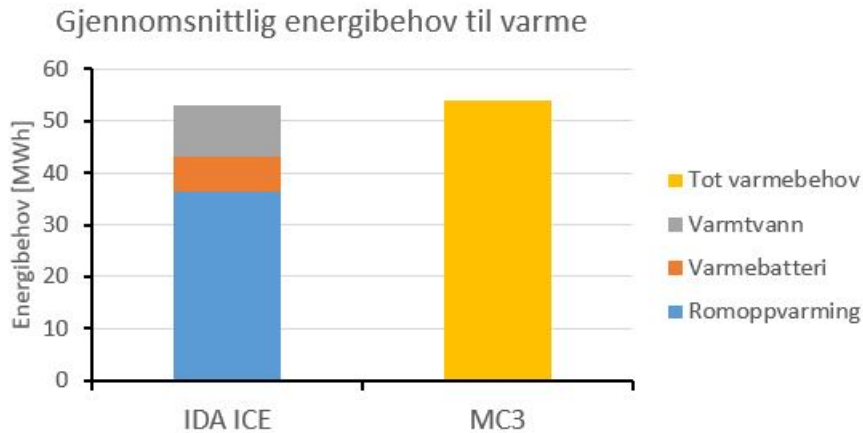
11.1 Varmebehov

Figur 11.1 viser en oppsummering av resultatet for Monte Carlo metode 3. Det blå området representerer variasjonen i topplast for 80 bygninger, og den grå stiplede linjen gir gjennomsnittlig topplast. X-aksen viser hvor mange av bygningene som er aggregert til en felles energi- og effektprofil, der 1 vil si 80 enkeltstående bygninger, 5 vil si at de 80 bygningene er aggregert i grupper på 5, og så videre. Ved å aggregere alle bygningene i området til felles energi- og effektprofil kan topplasten anslås mer presist, der sammenlagring er tatt hensyn til, tilsvarende 31,7 kW per bygning ved $x=80$ i figuren.



Figur 11.1: Variasjon i toppeffekt for 80 bygninger med økende antall aggregerte.

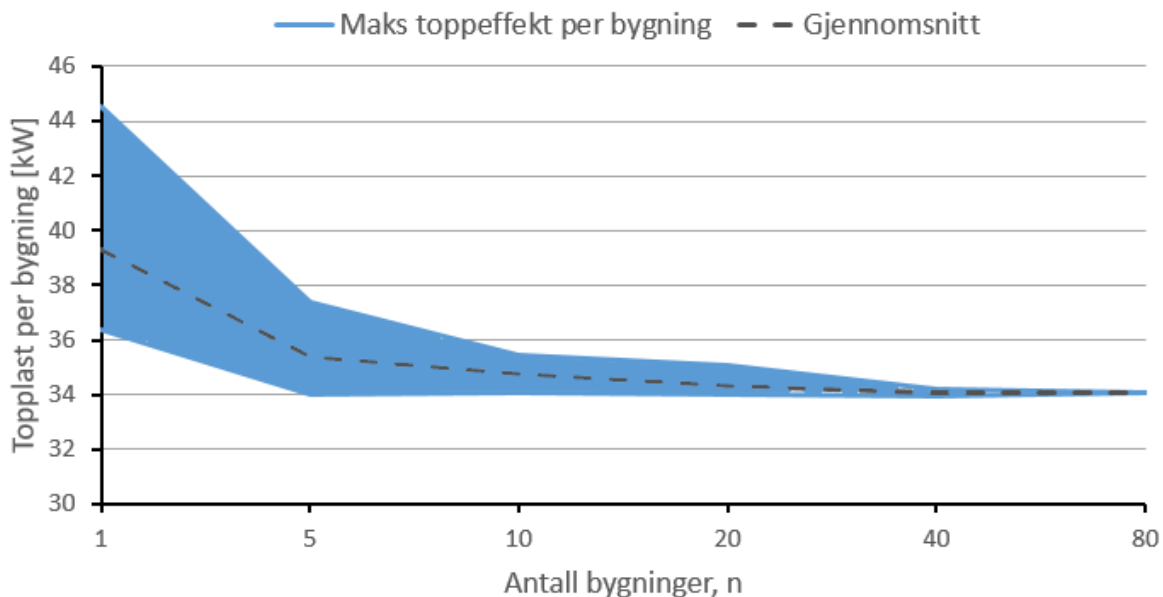
Selv om effektbehovet opererer med et sammenlagingsprinsipp, går ikke dette ut over energibehovet, som forblir omtrentlig det samme uansett beregningsmåte. Dette er vist i figur 11.2.



Figur 11.2: Gjennomsnittlig energibehov for referansebygninger og MC 3-profiler.

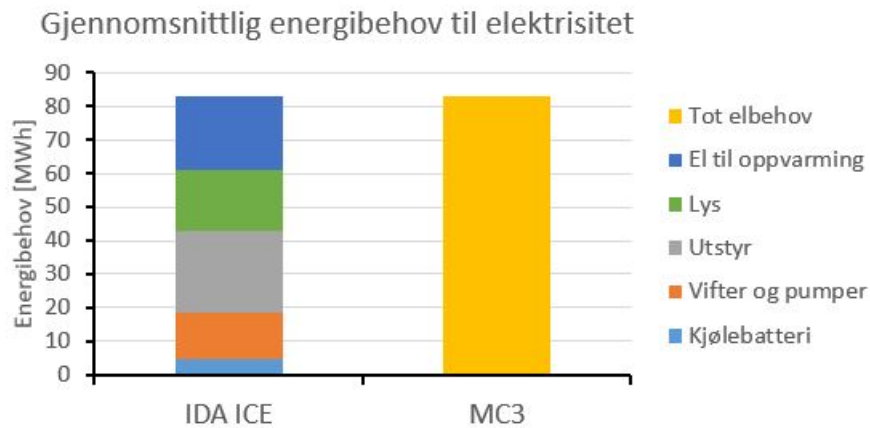
11.2 Elektrisitetsbehov

Resultatet av referansemodellen for elektrisitetsbehovet er vist i figur 11.3. Ved 80 separate bygninger varierer topplasten mellom 36 kW og 45 kW, men etter aggregering time for time av alle 80 bygningene anslås topplasten mer presist til 34 kW per bygning.



Figur 11.3: Variasjon i toppeffekt for elektrisitet med økende antall aggregerte bygninger.

Gjennomsnittlig energibehov for en kontorbygning på 2040 m² presenteres i figur 11.4. Også for elektrisitetsbehovet holdes energibehovet omtrent konstant uavhengig av sammenlagring.



Figur 11.4: Gjennomsnittlig energibehov for referansebygninger og MC 3-profiler.

11.3 Generell oppsummering av metode

Hovedfunnet i denne oppgaven er i første rekke metoden som er brukt til å komme frem til en god aggregering av kontorbygninger innenfor et område. Hovedtrekkene i metoden er oppsummert nedenfor.

1. Finne kilder med utgangspunkt i hvilken referansebygning som skal etableres. Valgene står mellom:
 - Eksempelbygg- Basert på standarder, fagbøker og forskning
 - Ekte bygning- Basert på data fra en ekte bygning som er typisk for sin bygningskategori
 - Teoretisk bygning- Basert på statistiske data som er gjennomsnittlig for sin bygningskategori
2. Samle informasjon om bygningsgeometri, bygningskropp, tekniske systemer, samt drift og bruk.
3. Simulere bygningen i IDA ICE. Analysere eller kalibrere ut fra hvilken type referansebygning som er etablert.
4. Finne typiske bruksvariasjoner for bygningskategorien, både innenfor selve brukerne og brukernes interaksjon med bygningen.

- Selve brukerne- Ulike brukerprofiler opprettes på nettsiden <http://occupancysimulator.lbl.gov/> med definerte soner og inngangsverdier.
 - Brukernes interaksjon med bygningen- Her kan det benyttes både statistiske data og driftsopplysninger hentet fra ulike bygninger innenfor bygningskategorien.
5. Opprette et prosjekt i IDA ICE, hvor variasjoner til referansebygningen kan implementeres og lagres som individuelle versjoner.
 6. Hente ut informasjon fra IDA ICE og definere et standardavvik for hver time i løpet av et år, basert på alle de simulerte variasjonene.
 7. Aggregere ønsket antall bygninger i området i Microsoft Excel, med stegene i ligning 11.1 til 11.6. $RAND()$ er et tilfeldig tall mellom 0 og 1, μ er gjennomsnittet eller referansebygningen og σ er standardavviket.

$$A1 = RAND() \quad (11.1)$$

$$B1 : B8760 = NORM.INV(\$A\$1; \mu; \sigma) \quad (11.2)$$

$$C1 : C8760 = NORM.INV(RAND(); \mu; \sigma) \quad (11.3)$$

$$D1 : D8760 = Klokkeslett (1 - 24) \quad (11.4)$$

$$E1 = IF(AND(D1 > 7; D1 < 17); C1; B1) \quad (11.5)$$

$$Ctrl + c(E1) \longrightarrow ctrl + v(E1 : E8760) \quad (11.6)$$

8. Summere hver time av ønsket antall bygninger og produsere energi- og effektprofiler for et definert bygningsområde.

12. Diskusjon

I dette kapitlet vil den overordnede metoden diskuteres, og de ulike aspektene ved oppgaven vil bli sett på med et kritisk blikk. Dette vil foregå i kronologisk rekkefølge, ved å først se på datagrunnlaget, før referansebygningen og programvaren IDA ICE vil bli diskutert. Videre reflekteres det over valg av algoritme og bruk av MC-metoden i bygningssammenheng, før utviklingen av bygningsområder og behovet for en slik metode vurderes helt til slutt.

12.1 Datagrunnlag

Når oppgaven skal handle om fremtidige bygninger må det hele tiden tenkes gjennom hva som er den mest fremtidsrettede informasjonen. Det ble brukt mye tid på å finne aktuelle kontorbygninger, med nok tilgjengelig informasjon, som kunne brukes som referanse. Etter flere avvisninger og måneder med ventetid på energidata, ble det bestemt at referansebygningen skulle baseres på standarder istedet. Dette minsket tiden til å hente ut data og gjøre simuleringer, noe som har påvirket datagrunnlaget og resultatet i oppgaven.

Å basere en referansebygning på standarder bringer opp spørsmålet om kalibrering. Teorien om energiplanlegging sier at kalibrering er et viktig hjelpemiddel for å få mer realistiske modeller. Dette var en av målsetningene i oppgaven. Men det er få, om noen, bygninger som følger standardene slavisk, og det ville bli mye arbeid å korrigere referansebygningen mot en reell bygning. Det ble også sett på som unødvendig å kalibrere en referansebygning som baserer seg på et gjennomsnitt.

I simulering av variasjoner innenfor drift og bruk, er det hentet data fra to ulike kontorbygninger, samt brukt programvare *Occupancy Simulator* utviklet på Lawrence Berkeley National Laboratory i California. Kontorbygningene Visund og Kjørbo er to av de mest energieffektive kontorbygningene som er i drift, og ble derfor sett på som representative for den fremtidige kontorbygningen. På en annen side er det ikke et representativt utvalg, med tanke på antall kontorbygninger, og utgjør derfor en usikkerhet i oppgaven. Om verdiene innenfor drift og bruk er vanlige driftsvariasjoner i bygninger, eller et avvik i akkurat denne kontorbygningen er vanskelig å si. Det ligger svært lite driftsopplysninger for bygninger tilgjengelig offentlig, og ikke alle bedrifter er åpne for å gi fra seg denne informasjonen. Det skal også sies at jobben med å kontakte flere driftsavdelinger ble nedprioritert på grunn av tid.

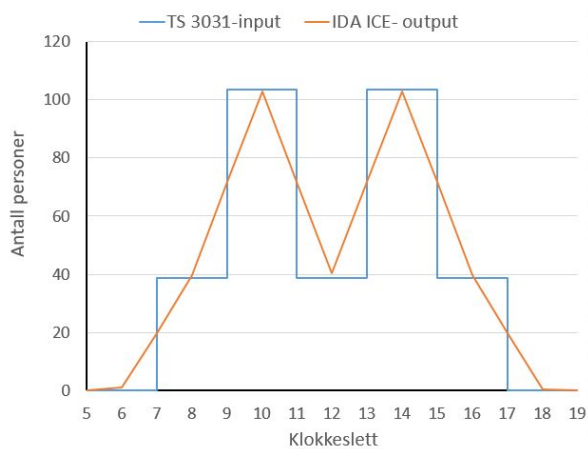
Occupancy Simulator er utviklet på bakgrunn av Annex 66, en rapport som er basert på forskningen til ca 100 forskere i 20 land. International Energy Agency står bak rapporten og anses

som en sikker kilde innenfor energibruk. Modelleringsverktøyet har tatt hensyn til flere forskningsartikler, og er utviklet av en anerkjent gruppe i ledelsen av Tianzhen Hong. Det er noen usikkerheter som må tas med i betraktningen. Disse er nevnt i kapittel 5.3.1. Et annet punkt, som kan gi utslag på energiberegningene, er at programvaren antar at de ansatte går ut av bygningen til lunsj. Dette er mer vanlig i for eksempel California, enn i Norge der det som regel er en kantine eller lunsjrom i samme bygning. I programvaren er det mulig å lage en ekstra sone, som kunne representert en kantine, men det ble ikke rettet oppmerksomhet mot dette før simuleringene varferdig utført.

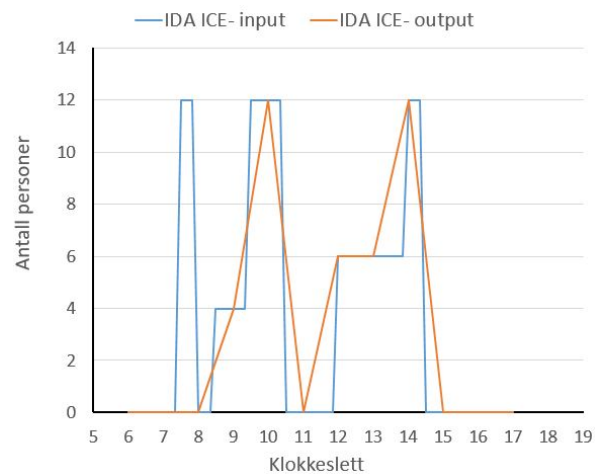
12.2 Referansebygning og IDA ICE

IDA ICE er en anerkjent og validert programvare, som fungerer godt til beregning av energibruk i bygninger. Andre programvarer som kunne vært aktuelle å benytte er Energy Plus og SIMIEN, men IDA ICE er mer utbredt blant bedrifter enn Energy Plus, og flere sammenligninger har konkludert med at IDA ICE beregner energibruken mer presist enn SIMIEN.

Likevel er det noen usikkerheter som er oppdaget, og det er vanskelig å si hvor stor påvirkning disse har. Først og fremst forenkles brukerprofilene fra inngangsverdi (input) til produkt (output), dette er illustrert i figur 12.1 og 12.2. Det totale integralet blir omtrent det samme, men fordelingen blir ulik. Det er også verdt å merke at i de selvproduserte brukerprofilene fra *Occupancy Simulator*, vil møter som varer kun en time bli neglisjert i resultatene fra IDA ICE-beregninger.



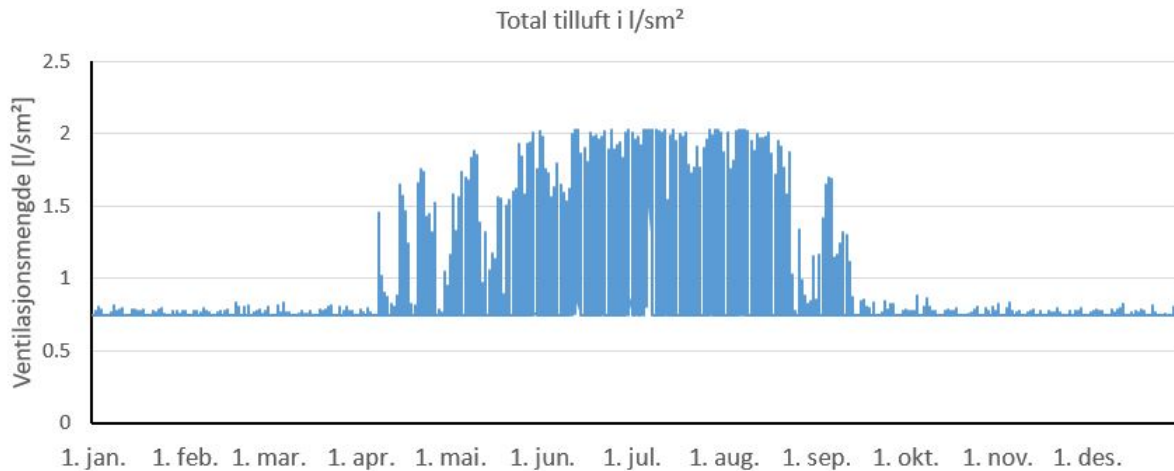
Figur 12.1: Total brukerprofil etter TS 3031



Figur 12.2: Brukerprofil for møterom.

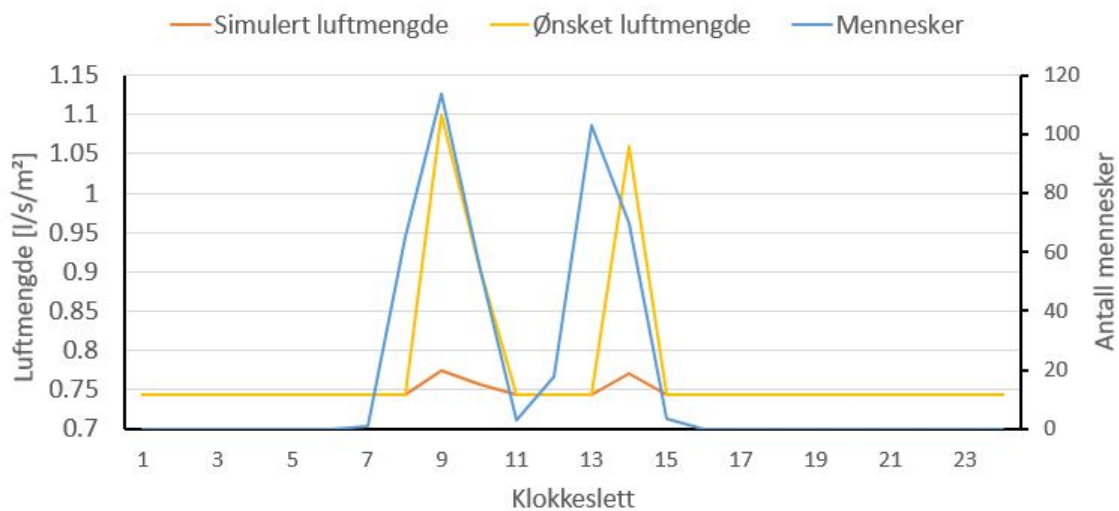
Et annet usikkert moment er VAV-ventilasjonen i IDA ICE. I tre av sonene er referansebygningen simulert med CO₂- og temperaturkontroll og med et blick på den totale lufttilførselen i

bygningen, i figur 12.3, mistenkes det at CO₂- kontrollen ikke fungerer like godt. Lufttilførselen stiger betraktelig på sommeren på grunn av temperaturen, men på vinterstid er det svært liten variasjon i luftmengden uavhengig av antall mennesker i bygningen.



Figur 12.3: Totalt tilført luftmengde i kontorbygningen over et år.

Figur 12.4 viser luftmengden en tilfeldig dag i januar, sammenlignet med antall mennesker i bygningen. Dette eksempelet benytter brukerprofil hentet fra *Occupancy simulator*. Den oransje grafen viser gjennomsnittlig simulert luftmengde, mens den gule grafen viser ønsket luftmengde i henhold til Passivhusstandarden og antall mennesker. Ut i fra dette ser det ut som at CO₂-kontrollen i IDA ICE ikke fungerer optimalt, eller at CO₂-utslippet fra mennesker er underdimensjonert.



Figur 12.4: Totalt tilført luftmengde i kontorbygningen en dag i januar.

Når det gjelder selve referansebygningen er det også gjort noen forenklinger, på grunn av simuleringstid og arbeidsmengde. Det er blant annet tatt utgangspunkt i en analyse utført i masteroppgaven til Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo [70], som konkluderte i at antall radiatorer og radiatorstørrelse har liten påvirkning på resultatet i forhold til levert varme. Det er derfor satt inn kun en radiator per sone, med variabel størrelse ut i fra ønsket varmeeffekt.

Det samme gjelder vinduer, da mange mindre vinduer kontra et stort vindu kun vil påvirke eventuelle dagslysregninger. Dette er ikke tatt hensyn til i denne oppgaven. Normalt sett er det forskjellig U-verdi langs vinduskarmer og i selve vinduet, men i simuleringen er det satt en gjennomsnittlig U-verdi på vindu og karm. Dette er for å unngå feilberegning når en setter inn store vinduer istedet for flere små. Færre vinduer sparer mye simuleringstid i IDA ICE.

12.3 Microsoft Excel og Monte Carlo-metoden

Målet med oppgaven var å finne en enkel og anvendelig metode for å aggregere brukerprofiler for kontorbygninger. Microsoft Excel er en standard programvare som de aller fleste har tilgang til, og kan benytte seg av i forskjellig grad. Excel er derfor et godt utgangspunkt, om man finner riktig måte å bruke programmet på. En ulempe med Excel er evnen til å prosessere store mengder med data, og kan derfor kortslutte om det skal prosjekteres et stort bygningsområde. Her er det viktig å benytte Excel-arket riktig, og ikke operere med alt for mange åpne filer samtidig.

12.3.1 Statistisk fordeling og standardavvik

Når det gjelder Monte Carlo-simuleringen, er dette en stokastisk modell som baserer seg på statistiske fordelinger. Dette er en godt etablert metode innenfor statistikkens verden, og spørsmålet er om den fungerer til formålet innenfor bygningssimulering.

Normalfordeling er den nærmeste reelle fordelingen, som er aktuell innenfor bruksvariasjoner i bygninger og som er lett tilgjengelig i Excel. Om brukerforskjeller innenfor en bestemt time er normalfordelt har ikke denne oppgaven funnet svar på, på grunn av for lite simuleringsutvalg. Er det for eksempel like sannsynlig at et kontormiljø benytter seg av lavere setpunkttemperatur til oppvarming, som høyere?

Innenfor dette området, er det også et spørsmål om hvilke referanseverdier det tas utgangspunkt i. Denne oppgaven tar utgangspunkt i gjennomsnittet til alle de simulerte variasjonene, mye på grunn av at variasjonen med nattesenking av setpunkttemperatur for oppvarming skapte et ujevnt standardavvik avhengig av driftstid. Det ideelle vil være å simulere et referansebygg og deretter benytte seg av en mal på prosentandel standardavvik i forhold til energibehovet, da kun

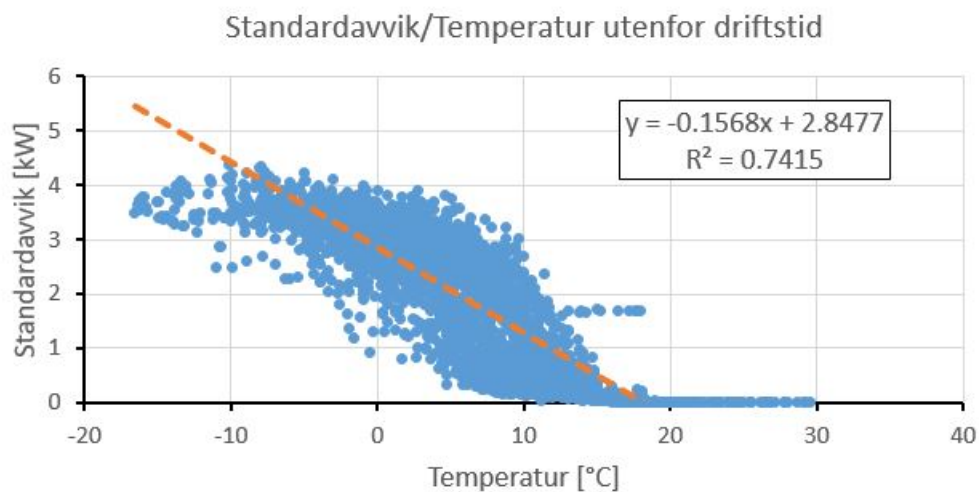
basert på mulige forskjeller innenfor drift og bruk. Standardavviket brukt i denne oppgaven er et godt eksempel, men er ikke basert på nok data til å kunne etableres som mal.

For at det skal være mulig å benytte verdiene til en enkelt referansebygning, anbefales det å tidlig bestemme om nattesenking av temperatur skal benyttes i hele bygningsområdet eller ikke. Erfaring fra simuleringene i denne oppgaven tilsier at nattesenking av temperatur gir et avvik som ikke fanges opp i standardavviket.

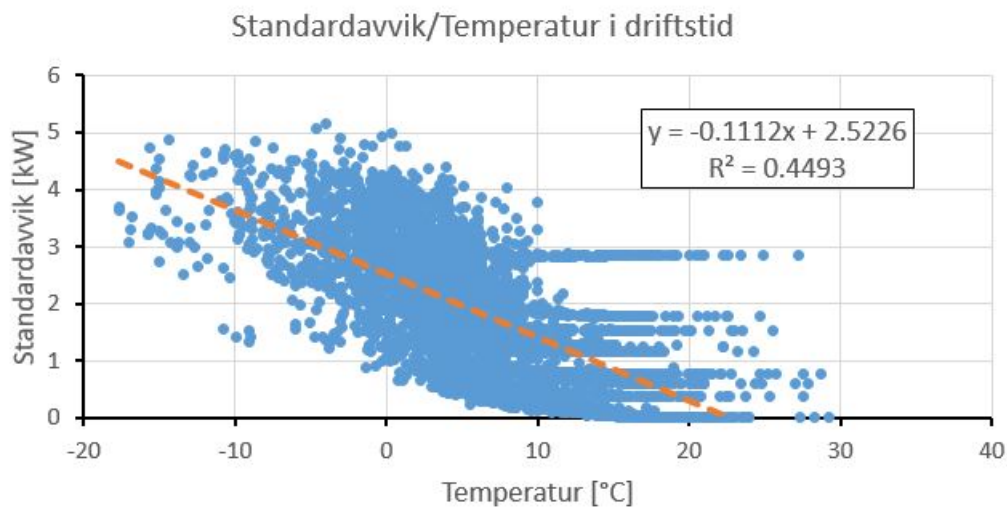
12.3.2 Monte Carlo metode 1 og 2

Det ble valgt å benytte to forskjellige fremgangsmåter avhengig av tid på døgnet. Monte Carlo metode 1 varierer alle timesverdiene identisk, som vil si at sammenlagringen blir lik 1, altså like effekttopper men med ulike verdier mellom bygningene. Denne metoden blir brukt utenfor driftstid, og vil være aktuell i perioder der bygningsindividuelle tids- og effektforskjeller ikke forekommer. Monte Carlo metode 2 varierer alle timesverdiene vilkårlig, og er aktuell på tidspunkt hvor bygningsindividuelle tids- og effektforskjeller forekommer, altså ulike mønster for effektbehov.

Om avvikene i effektbehovet er temperaturavhengig, vil dette gjelde for alle bygningene i hele området, og det blir dermed ingen tidsforskjeller i effekttoppene. Her vil metode 1 være nyttig. I figur 12.5 og 12.6 er det utført en analyse av varmebehovet for å finne ut om standardavvikene er temperaturavhengige i og utenfor driftstid, og i hvor stor grad.



Figur 12.5: Spredningsplott av forholdet mellom standardavvik og temperatur utenfor driftstid.



Figur 12.6: Spredningsplott av forholdet mellom standardavvik og temperatur i driftstid.

R^2 verdien sier noe om hvor stor sammenheng det er mellom verdiene, der 1 er 100 % sammenheng og 0 er ingen sammenheng. Figurene bekrefter antagelsene gjort i metoden, med en sammenheng på 0,74 mellom temperatur og standardavvik utenfor driftstid. Dette gir en god sammenheng, noe som betyr at svingningene i effekt vil være tilsvarende i alle bygningene selv med driftsforskjeller. Det er dermed riktig å bruke MC 1 utenfor driftstid.

Sammenhengen på 0,45 i driftstid forteller at noen svingninger er temperaturavhengig, men at største delen er avhengig av andre faktorer. Dette gjør effektbehovet mer uforutsigbart og effekttopper kan forekomme på forskjellige tidspunkt i ulike bygninger. Det er dermed naturlig å benytte MC 2 innenfor driftstid.

12.3.3 Sammenlagring

Selv om det er bra med lav sammenlagringsfaktor for mest mulig mangfold i resultatene, er det en grense for hvor lav faktor som er realistisk. I et område med bare like bygninger, som er tilfelle i denne oppgaven, skal det mye til at den reelle sammenlagringsfaktoren blir lavere enn 0,9. Det er lite forskning på akkurat dette, men begrensede bruksforskjeller og begrenset aktivt tidsrom, gjør det vanskelig med store variasjoner i effektbehovet. På bakgrunn av dette kan det stilles spørsmål ved om en sammenlagringsfaktor på 0,85 for elektrisitetsbehovet er reelt.

12.4 Videre utvikling

Til slutt skal det diskuteres litt rundt nytten referansemodellen, hvordan den kan hjelpe en konsulent i samtale med byggherre, og i fremtidig utvikling av drift og bruk av bygninger.

Det er påvist at kommunikasjon med byggherre har mye å si for utførelsen av nye, kompliserte og energieffektive bygninger og bygningsområder. Grunnlaget for god kommunikasjon og kunnskapsoverføring må legges i designfasen, med struktur, tydelige dokumenter og kontinuerlig kommunikasjon. Muligheten for å kunne legge frem et godt estimat på energi- og effektbehov tidlig i prosessen, der sammenlagring er tatt hensyn til, kan bidra til tillit ovenfor konsulenten. Siden mye av konsulentbransjen er konkurransebasert kan det bidra til å overbevise byggherre om at denne konsulenten har nødvendig kontroll og kunnskap.

Ved å ha denne referansemodellen etablert er det fort gjort å produsere nødvendige energi- og effektprofiler for hele området med kontorbygninger. Informasjon om hvilke energikilder som er mest lønnsomme med bakgrunn i energibehov og effektprofil kan blant annet fastslås tidlig. Det kan imidlertid diskuteres om 10 % effekt fra eller til har noe å si for byggherre så tidlig i prosessen, både når det gjelder kostnader og tillit til konsulent.

Angående fremtidig utvikling av drift og bruk av bygninger, blir bygninger mer og mer automatiserte, og brukerne får mindre og mindre kontroll over driften. Dette kan bidra til mindre forskjeller innad i bygningskategorier, og metoden for aggregering i fremtiden blir kanskje å multiplisere referansebygningen i riktig antall bygninger?

På en annen side kan det ved utfasing av fossile energikilder bli større press på strømmettet der stort effektuttak vil være en flaskehals. Smarte strømmålere (AMS) bidrar til mer fokus på effektbruken i strømmettet, hvor samtidighet blant bygninger blir enklere å dokumentere. Det vil komme stadig mer data å basere forskning og prognoser på, og det blir desto viktigere å forutsi realistiske effektprofiler for store områder.

13. Konklusjon

Hovedmålet med oppgaven var å utvikle en metode som kan anvendes for en bedre og mer treffsikker estimering av energi- og effektbehov på områdenivå. Metoden skulle være enkel å bruke og mulig å adaptere for en konsulent uten tilgang på avanserte programvarer.

Opgaven tar utgangspunkt i kontorbygninger, med fokus på samtidighet på grunn av forskjellig drift og bruk av bygninger. Den endelige metoden baserer seg på en blanding av fysisk modellering med IDA ICE og en matematisk informasjonsbasert tilnærming gjennom Microsoft Excel og Monte Carlo-simulering.

Først blir det etablert en referansebygning i IDA ICE basert på Passivhusstandarden, før det blir simulert flere variasjoner av referansebygningen basert på kjente driftsvariasjoner for kontorbygninger. Energi- og effektprofiler for varmebehov og elektrisitetsbehov blir videreført inn i Microsoft Excel hvor det blir utført en Monte Carlo-simulering. Denne er basert på en tilfeldig sannsynlighetsverdi, gjennomsnittlig energibehov og standardavvik for hver time i løpet av et år. Ut i fra dette produseres det ønsket antall bygningsprofiler, som summeres time for time, og danner en aggregert total energiprofil for et bygningsområde.

Monte Carlo-simuleringen er basert på normalfordeling, med timesbaserte tilfeldige sannsynlighetsverdier i driftstiden klokken 07-17, og felles årlig sannsynlighetsverdi utenfor driftstiden.

Metoden resulterte i en sammenlagningsfaktor ned mot 0,89 for varmebehovet til et område med 80 kontorbygninger. I tillegg gjorde aggregeringen det mulig å estimere maksimal effekt per bygning fra en usikkerhet på 32-40 kW til mer presist 32 kW per bygning. Tilsvarende for elektrisitetsbehovet en sammenlagningsfaktor på 0,86 og en usikkerhet mellom 36-44 kW maksimal effekt til mer presist 34 kW per bygning.

Oppsummert konkluderes det med at dette er en anvendelig metode, som gir et godt bilde på et mangfold av bygninger med ulik samtidighet på grunn av drift og bruk. Samtidig trengs det mer forskning angående variasjoner i drift og bruk, slik at det kan opprettes en pålitelig mal for gjennomsnittsverdi og standardavvik av varmebehov og særlig elektrisitetsbehov.

14. Videre arbeid

- Hovedoppgaven for videre arbeid vil være å finne og verifisere mer pålitelige variasjoner innenfor drift og bruk av kontorbygninger. Dette gjelder både kombinasjoner av eksisterende variasjoner og ved å kontakte flere driftsavdelinger som opererer innenfor Passivhusstandard.
- For å gjøre prosessen enkel og rask for konsulentbransjen er det en fordel å utvikle en database, der ønsket antall bygninger produseres automatisk basert på Monte Carlo metode 3, med tilhørende grafer.
- Energi- og effektprofilene kan utvikles mer spesifikt ved å separere de ulike energipostene, som romoppvarming, kjøling, elektrisitet til lys og utstyr osv.
- Med bakgrunn i usikkerhet rundt elektrisitetsbehovet kan det være nyttig å finne aktuelle måledata å kalibrere referansebygningen mot.

Referanser

- [1] SNL. Parisavtalen. <https://snl.no/Parisavtalen>, Hentet mai 2019.
- [2] FN-Sambandet. Klimaendringer. <https://www.fn.no/Tema/Klima-og-miljoe/Klimaendringer>, Oktober 2018.
- [3] IEA. Key World Energy Statistics, 2015. <https://www.iea.org/statistics/kwes/efficiency/>, Hentet desember 2018.
- [4] NVE. Energi og effekt. <https://www.nve.no/energibruk-og-effektivisering/energibruk-i-norge/energi-og-effekt/>, Hentet desember 2018.
- [5] ZEB. About the ZEB Centre. <https://www.zeb.no/index.php/en/about-zeb/about-the-zeb-centre>, Hentet desember 2018.
- [6] FME ZEN. About us. <https://fmezen.no/about-us/>, Hentet desember 2018.
- [7] H.Yoshino, T.Hong, N.Nord. Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. *IEA EBC annex 53*, page 11, 2017.
- [8] THEMA Consulting group. Energibruk i kontorbygg- Trender og drivere. *Rapport nr 9-NVE*, 2013.
- [9] S.P. Corgnati et al. Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. *Applied Energy*, 102:983 – 993, 2013.
- [10] International Energy Agency. Energy Efficiency 2018. <https://www.iea.org/efficiency2018/>, Hentet desember 2018.
- [11] Enova. Potensial- og barrierestudie. *Enovarapport 2012:1*, page 58, 2012.
- [12] Enova. Om Enova. <https://www.enova.no/om-enova/>, Hentet desember 2018.
- [13] Enova. Enova tar byggsektoren mot lavutslippssamfunnet. <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/tema/enova-tar-byggsektoren-til-lavutslippssamfunnet/>, Hentet desember 2018.
- [14] Trondheim kommune. Kommunedelplan: energi og klima 2017–2030. pages 2–9,26–32, 2017.
- [15] Lovdata. Byggteknisk forskrift (TEK17). <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>, Hentet desember 2018.
- [16] DIBK. Dette er energikravene i byggteknisk forskrift. <https://dibk.no/verktoy-og-veivisere/energi/dette-er-energikravene-i-byggteknisk-forskrift/>, Hentet desember 2018.

- [17] Standard Norge. Beregning av energibehov og energiforsyning. *Standard online AS*, 2016.
- [18] Standard Norge. Kriterier for passivhus og lavenergibygninger- yrkesbygninger. *Standard online AS*, 2012.
- [19] CEN/TC 156 Ventilation in buildings. Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk. *Standard Norge*, 2007.
- [20] Tore Wigenstad. Optimalisering av føringsveier for tekniske installasjoner i bygninger. *NTNU*, pages 12–14, 2000.
- [21] Regjeringen. Klimaforliket(2014). <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/>, Hentet desember 2018.
- [22] Lovdata. Forskrift om forbud mot bruk av mineralolje til oppvarming av bygninger. <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2018-06-28-1060>, Hentet desember 2018.
- [23] Victoria Armstrong. Får klimakritikk for statsbudsjettet: – Bryter med klimaforliket(2015). <https://e24.no/privat/statsbudsjettet-2016/faar-klimakritikk-for-statsbudsjettet-bryter-med-klimaforliket/23538049>, Hentet desember 2018.
- [24] Ellen Viseth. Norge innfrir ikke Klimaforliket(2017). <http://bellona.no/nyheter/klima/2017-03-norge-innfrir-ikke-klimaforliket>, Hentet desember 2018.
- [25] Olje- og energidepartementet. Åpent møte om energimerkeordningen for bygninger. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/apent-mote-om-energimerkeordningen-for-bygninger/id2626108/>, Hentet mai 2019.
- [26] Energi Norge AS. Vil endre energimerkeordningen for bygg. *Energi Norge- Energibruk og klima*, 2019.
- [27] N.L. Eik-Nes (EDS.) A.G. Hestnes. *Zero Emission Buildings*. Fagbokforlaget, 2017.
- [28] Enova. Enovas byggstatistikk 2016. *Enova SF*, 2016.
- [29] Yngve Vogt. Verdens mest effektive og miljøvennlige solceller. *Apollon*, 2017.
- [30] SSB. Fjernvarme og fjernkjøling. <https://www.ssb.no/fjernvarme>, Hentet april 2019.
- [31] Lavenergiprogrammet. Fjernvarme. <https://bygg.tekna.no/fjernvarme/>, Hentet mai 2019.

-
- [32] J. Salom og U.I. Dar I. Sartori, J. Ortiz. Estimation of load and generation peaks in residential neighbourhoods with bipv:bottom-up simulations vs. velerander method. *WSB Conference- World Sustainable Buildings, 28-30 Okt, 2014*.
- [33] DistriktsEnergi. Nye regler om effekttariffer planlagt gjeldende fra 1.1.2021. 2019.
- [34] A. Fidje J.E. Fonnelop O. Isachsen E. Skaansar D. Spilde L. Henden, T. Ericson. Batterier i bygg kan få betydning for det norske kraftsystemet. *NVE*, pages 1–29, 2017.
- [35] Inger Andresen. Definition criteria- pilot projects. *ZEN- Power Point fra forelesning*, 2019.
- [36] Moslem Uddin et al. A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pages 3323 – 3332, 2018.
- [37] Claudio Del Pero et al. Energy storage key performance indicators for building application. *Sustainable Cities and Society*, pages 54 – 65, 2018.
- [38] J. Page, D. Robinson, N. Morel, and J.-L. Scartezzini. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings*, pages 83 – 98, 2008.
- [39] Chuang Wang, Da Yan, and Yi Jiang. A novel approach for building occupancy simulation. *Building Simulation*, pages 149–167, Jun 2011.
- [40] Mathias Stensland Lillevold. Sammenligning av beregnet og målt energi- og effektbehov i kontorbygg. *NTNU Masteroppgave*, 2017.
- [41] Å.L Sørensen et al. Pilot building powerhouse kjørbø- as built report. *ZEB Project report*, 2017.
- [42] Da Yan and Tianzhen Hong. Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings. *International Energy Agency, EBC Annex 66*, 2018.
- [43] Hong T Feng X, Yan D. Simulation of occupancy in buildings. *Energy and Buildings*, 87, page 348–359, 2015.
- [44] Reinhart CF. Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77, pages 15–28, 2004.
- [45] Yixing Chen, Tianzhen Hong, and Xuan Luo. An agent-based stochastic occupancy simulator. *Building Simulation*, 11:37–49, Feb 2018.
- [46] The engineering toolbox. Met- Metabolic rate. https://www.engineeringtoolbox.com/met-metabolic-rate-d_733.html, Hentet april 2019.
- [47] Lawrence Berkeley National Laboratory. Realistic Schedule for Office Spaces for BEM. <http://occupancysimulator.lbl.gov/>, Hentet mars 2019.
- [48] Ravita D. Prasad, R.C. Bansal, and Atul Raturi. Multi-faceted energy planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38:686 – 699, 2014.

-
- [49] B. O’Doherty R. Judkoff, D. Wortman and J. Burch. A methodology for validating building energy analysis simulations. *National Renewable Energy Laboratory*, pages 1–4, 2008.
- [50] Paul Raftery, Marcus Keane, and James O’Donnell. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9):2356 – 2364, 2011.
- [51] EQUA Simulation AB. Om EQUA . <https://www.equa.se/se/about-us/about-equa>, Hentet desember 2018.
- [52] EQUA Simulation AB. IDA Indoor Climate and Energy . <https://www.equa.se/en/ida-ice>, Hentet desember 2018.
- [53] Standard Norge. NS-EN 15265:2007. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=307244>, Hentet desember 2018.
- [54] EQUA Simulation AB. Validations and certifications. <https://www.equa.se/en/ida-ice/validation-certifications>, Hentet desember 2018.
- [55] Standard Norge. NS-EN ISO 52016-1:2017. <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=941512>, Hentet desember 2018.
- [56] Aline Schaefer and Enedir Ghisi. Method for obtaining reference buildings. *Energy and Buildings*, 128:660 – 672, 2016.
- [57] Nima Norouzi et al. The architect, the client and effective communication in architectural design practice. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pages 635 – 642, 2015.
- [58] Ellen Thuestad Løkås. Tilrettelegging for god kunnskapsoverføring mellom prosjektering og produksjon i totalentrepriseprosjekter. *Brage bibsys, Master’s theses (IMT)*, 2014.
- [59] Dmytro Ivanko Natasa Nord og Igor Sartori Tymofii Tereshchenko. Analysis of energy signatures and planning of heating and domestic hot water energy use in buildings in norway. *Epost fra Tymofii Tereshchenko*, 2019.
- [60] Kadir Amasyali and Nora M. El-Gohary. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pages 1192 – 1205, 2018.
- [61] Kristian S. Skeie Kari Sørnes, Igor Sartori. Zen wp4 energy flexible neighbourhoods. *ZEN*, 2018.
- [62] Jan S. Næss Natasa Nord, Tymofii Tereshchenko. Building energy demand and energy planning. *Energy Planning- TET 4135*, pages 46–48, 2018.
- [63] D. Agote I. Fernández Y.K. Peña, C.E. Borges. Short-term load forecasting in air-conditioned non-residential buildings. *IEEE Int Symp Ind Electron*, pages 1359–1364, 2011.

- [64] Linda Pedersen. Load modelling of buildings in mixed energy distribution systems. *NTNU, Department of Energy and Process Engineering*, 2007.
- [65] Karen B. Lindberg. Impact of zero energy buildings on the power system. *NTNU, Department of Electric Power Engineering*, 2017.
- [66] Ian Farrance og Robert Frenkel. Uncertainty in measurement: A review of monte carlo simulation using microsoft excel for the calculation of uncertainties through functional relationships, including uncertainties in empirically derived constants. *National Center for Biotechnology Information*, 2014.
- [67] Michael Galarnyk. Explaining the 68-95-99.7 rule for a normal distribution. *Towards Data Science*, 2018.
- [68] T.H Dokka et al. A zero emission concept analysis of an office building. *ZEB*, 2013.
- [69] Å.L.Sørensen et al. The visund office building, haakonservern, bergen- as built report. *ZEB*, 2017.
- [70] Eirik Andre Nesgård og Minh Huy Ngo. Framtidens energiveier for bygninger - muligheter for energieffektivisering og konvertering til fornybar energikilde i bygningsmasse. *NTNU Open*, pages 110–111, 2018.

VEDLEGG

A Inputparametre i Occupancy Simulator

Bygningstype: Office-Small
 Areal [m²]: 2040
 Antall rom: 20
 Antall mennesker: 120
 Type mennesker: 100% Regular Staff

Sone	Type rom	Areal [m ²]	Antall brukere	Antall etasjer
Cellekontor	Office-private	136	13	4
Landskap	Lobby	156	17	4
Møterom	Meeting room	70	-	4
Spesialrom	Auxiliary	70	-	4
Trafikk	Corridor	77	-	4

Beskrivelse	Tid	Variasjon	Varighet	Variasjon
Ankomst/avreise	07.30-16.30	± 30 min	-	-
Kaffepause 1	10.00	± 15 min	15 min	± 5 min
Lunsj	11.45	± 45 min	45 min	± 15 min
Kaffepause 2	14.00	± 15 min	15 min	± 5 min

Beskrivelse	Eget kontor	Andre kontor	Møterom	Spesial/Trafikk	Utendørs
Gj.snitt brukstid [%]	70	10	10	5	5
Gj.snitt sammenhengende tilstedeværelse [min]	60	20	60	10	20

B Rapport for oppgavens referansebygning tatt fra IDA ICE

Zones

Zone	Group	Zone multiplier, M	Min temp, °C	Max temp, °C	Min op temp, °C	Max op temp, °C	Max heat supplied, W/m2	Room unit heat, W/m2
Møterom1		1	20.8	26.2	20.8	26.1	14.91	16.92
Cellekontor1		1	20.9	26.4	20.8	26.1	14.25	18.41
Trafikk1		1	20.7	24.4	21	24.3	4.711	7.501
Spesialrom1		1	21	26.3	21.4	25.6	3.993	4.965
Landskap1		1	20.7	25.8	20.9	25.4	7.855	10.58
Møterom2		1	20.9	26.8	20.8	26.6	12.93	14.9
Trafikk2		1	21	25.1	21	25	3.329	4.767
Spesialrom2		1	21.2	27.1	21.4	26.5	3.12	2.045
Landskap2		1	20.9	26.8	21	26	5.898	8.124
Møterom4		1	20.8	26.6	20.8	26.5	16.19	18.21
Cellekontor4		1	20.8	27.1	20.8	26.5	15.67	20.01
Trafikk4		1	20.7	25	21	24.9	6.158	9.178
Spesialrom4		1	21.1	27	21.4	26.4	3.14	6.034
Landskap4		1	20.8	26.7	21	25.9	9.277	12.14
Cellekontor2		1	20.9	27.3	20.8	26.7	12.42	15.43
Møterom3		1	20.8	26.8	20.8	26.6	12.96	14.93
Trafikk3		1	21	25.1	21	25.1	3.232	4.783
Landskap3		1	20.9	26.8	21	26	5.944	8.169
Spesialrom3		1	21.1	27.2	21.4	26.6	2.976	2.089
Cellekontor3		1	20.9	27.4	20.8	26.7	12.44	15.45

Max heat removed, W/m2	Dry vent cool, W/m2	Max sup airflow, L/(s m2)	Max rtn airflow, L/(s m2)	Max solar gain, W/m2	Min rel hum, %	Max rel hum, %	Max CO2, ppm (vol)	Max PPD, %
25.91	21.29	2.701	2.654	50.77	4.524	67.92	736.5	12.34
26.48	23.37	2.804	2.754	67.62	4.47	66.61	737.4	12.69
10.42	5.823	0.865	0.8581	14.15	4.491	68.6	685.2	7.543
13.05	7.561	0.865	0.8576	0	4.449	69.28	685.6	10.68
20.56	16.09	2.174	2.136	55.83	4.469	66.04	737.6	10.12
26.34	22.8	2.704	2.658	50.77	4.532	68.35	736.2	15.62
10.02	6.577	0.865	0.8581	14.15	4.483	67.32	686.6	8.234
13	8.43	0.865	0.8574	0	4.404	67.57	685.7	15.26
21.05	17.64	2.179	2.141	55.83	4.459	66.69	737.7	12.17
26.51	22.22	2.701	2.654	50.77	4.518	68.22	736.5	14.72
26.81	24.79	2.809	2.761	67.62	4.464	67.03	737.4	15.25
11.09	6.498	0.865	0.858	14.15	4.487	67.63	685.2	7.982
12.85	8.324	0.865	0.8575	0	4.459	66.75	685.6	14.84
20.64	17.25	2.179	2.142	55.83	4.468	66.41	737.6	11.58
27.16	25.66	2.812	2.763	67.62	4.461	67.55	737.2	15.17
26.42	22.88	2.704	2.658	50.77	4.531	68.31	736.3	15.68
10.13	6.679	0.865	0.8581	14.15	4.483	67.13	686.6	8.445
21.04	17.76	2.179	2.141	55.83	4.459	66.69	737.7	12.23
13.08	8.562	0.865	0.8575	0	4.408	67.03	685.7	15.02
27.16	25.84	2.812	2.763	67.62	4.46	67.53	737.2	15.25

Zone	Max age of air, h	In use, h	h of T_op>25, h	h of T_op>27, h	Occ. hours, h	PDH, h	Unmet hours (cooling)	Unmet hours (heating)
Møterom1	1.16	2595	86.45	0	5761	357.8	51.21	0
Cellekontor1	1.161	2595	54.64	0	11163	670.6	48.3	0
Trafikk1	0.9484	2595	0	0	6401	361.4	0	0
Spesialrom1	0.956	2595	52.07	0	5710	321.3	281.1	0
Landskap1	1.161	2595	7.783	0	12802	727.8	24.82	0
Møterom2	1.159	2595	237.9	0	5761	360.6	102.5	0
Trafikk2	0.95	2595	0.09075	0	6401	358.1	4.39	0
Spesialrom2	0.959	2595	506	0	5710	368	943.6	0
Landskap2	1.161	2595	20.72	0	12802	728.7	61.71	0
Møterom4	1.16	2595	159.6	0	5761	361.6	72.94	0
Cellekontor4	1.161	2595	91.21	0	11163	676.7	111.3	0
Trafikk4	0.9496	2595	0	0	6401	366	0.3561	0
Spesialrom4	0.959	2595	281.3	0	5710	344.5	476.1	0
Landskap4	1.161	2595	16.84	0	12802	734.6	41.17	0
Cellekontor2	1.16	2595	134.8	0	11163	672.1	156.3	0
Møterom3	1.159	2595	238.1	0	5761	360.8	104.2	0
Trafikk3	0.95	2595	0.3336	0	6401	359.4	5.772	0
Landskap3	1.161	2595	21.22	0	12802	729	62.5	0
Spesialrom3	0.959	2595	548.4	0	5710	372.4	957.2	0
Cellekontor3	1.16	2595	135.5	0	11163	672.2	158.9	0
					167348	9903.6		

Energy balance (sensible only)

	Envelope & Thermal bridges, kWh	Internal Walls and Masses, kWh	Window & Solar, kWh	Mech. supply air, kWh	Infiltra- tio & Openings, kWh	Occu- pant s, kWh	Equip- me nt, kWh	Lighting, kWh
Total	-30998.7	297.3	16896	-78465.6	-4676	13498.2	31526.3	20891.8
During heating	-10288.3	11117.3	-21003.7	-13254	-2310.5	1332.7	1589.7	2386.1
During cooling	-12400	-17095	37452.9	-45640.7	-879.4	7057.1	20650.9	10924.7
Rest of time	-8310.4	6275	446.8	-19570.9	-1486.1	5108.4	9285.7	7581

Delivered Energy

Local heating units, kWh	Meter	Total, kWh	Per m2, kWh/m2	Peak demand, kW
31048.6	Lighting, fa	20891	10.25	8.156
30406.9	Electric coc	694.3	0.3405	3.579
0	HVAC aux	15001.2	7.357	6.334
641.7	Electric hez	2119.6	1.039	14.92
	Equipment	31527	15.46	19.25
	Heating, te	16323.8	8.005	6.023
	CHP electri	0	0	0
	Total	86556.9	42.4515	58.262

C Sammenligningsrapport for alle simuleringene med brukervariasjoner

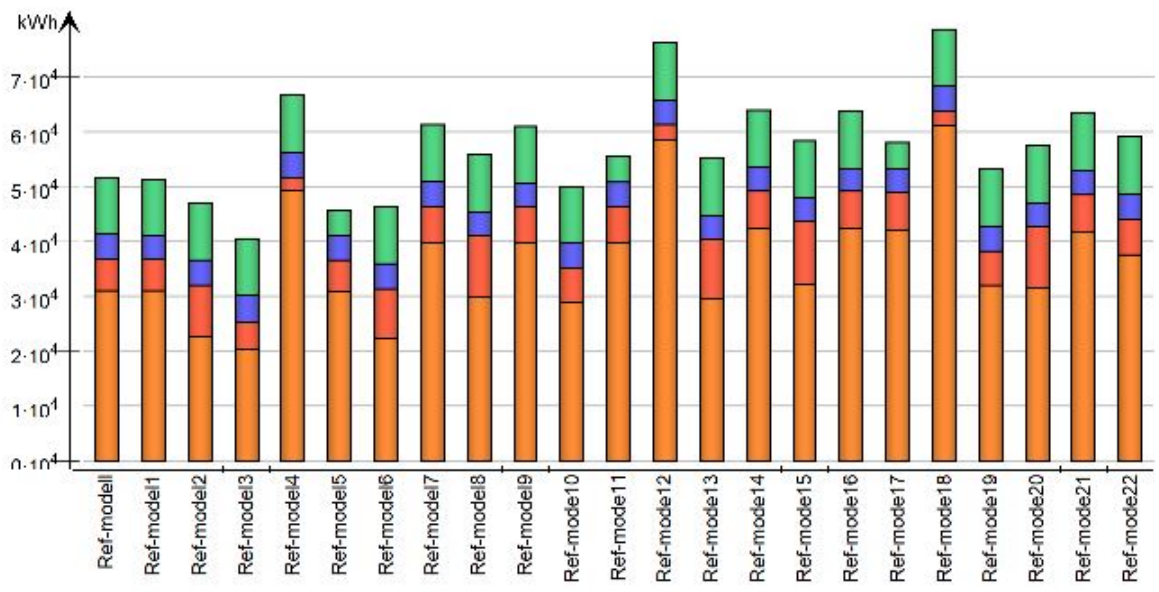
Forklaring

Ref-model	= Standard	Ref-mode11	= Profil 1-Mindre varmtvann
Ref-model1	= Åpne vindu	Ref-mode12	= Profil 1- Høyere set.temp
Ref-model2	= Nattesenking	Ref-mode13	= Profil 1- Lavere set.temp
Ref-model3	= Elektrisitet	Ref-mode14	= Brukerprofil 2
Ref-model4	= Høyere set.temp	Ref-mode15	= Profil 2- Nattesenking
Ref-model5	= Mindre varmtvann	Ref-mode16	= Profil 2- Åpne vindu
Ref-model6	= Lavere set.temp	Ref-mode17	= Profil 2- Mindre varmtvann
Ref-model7	= Brukerprofil 1	Ref-mode18	= Profil 2- Høyere set.temp
Ref-model8	= Profil 1- Nattesenking	Ref-mode19	= Profil 2- Elektrisitet
Ref-mode9	= Profil 1- Åpne vindu	Ref-mode20	= Profil 2- Lavere set.temp
Ref-mode10	= Profil 1- Elektrisitet	Ref-mode21	= Brukerprofil 3

Totalt brukt energi

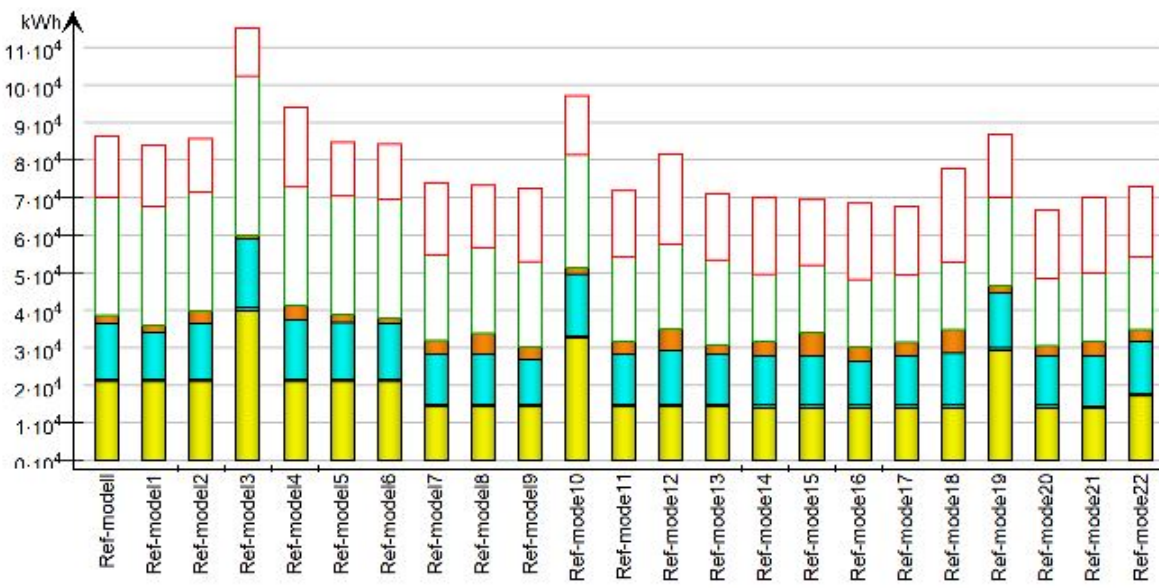
kWh

Case	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water
Ref-modell	31048.2	0.0	5717.8	4619.9	10397.9
Ref-model1	31063.3	0.0	5719.5	4297.3	10397.9
Ref-model2	22764.9	0.0	9314.2	4615.3	10397.8
Ref-model3	20412.4	0.0	4944.8	4853.0	10398.0
Ref-model4	49299.9	0.0	2300.0	4656.5	10397.6
Ref-model5	30944.9	0.0	5707.3	4503.8	4680.0
Ref-model6	22242.3	0.0	9096.4	4616.4	10398.0
Ref-model7	39789.3	0.0	6699.8	4473.2	10397.7
Ref-model8	29938.6	0.0	11073.1	4466.2	10397.5
Ref-model9	39782.9	0.0	6700.3	4186.8	10397.7
Ref-mode10	28856.6	0.0	6266.2	4618.0	10397.7
Ref-mode11	39757.8	0.0	6696.4	4362.1	4680.0
Ref-mode12	58607.7	0.0	2677.8	4525.2	10397.6
Ref-mode13	29485.7	0.0	10796.0	4465.5	10397.8
Ref-mode14	42245.0	0.0	6927.0	4420.6	10397.7
Ref-mode15	32133.7	0.0	11437.7	4409.6	10397.5
Ref-mode16	42241.3	0.0	6926.6	4150.1	10397.7
Ref-mode17	42204.8	0.0	6924.4	4314.2	4680.0
Ref-mode18	61039.5	0.0	2766.2	4478.7	10397.6
Ref-mode19	31999.7	0.0	6218.8	4640.0	10397.7
Ref-mode20	31582.9	0.0	11184.1	4408.7	10397.7
Ref-mode21	41640.8	0.0	6871.5	4436.5	10397.7
Ref-mode22	37544.0	0.0	6567.2	4547.5	10397.7



Energi per bygningsdel

Lighting, facility
Electric cooling
HVAC aux
Electric heating
Total, Facility electric
Total
Equipment, tenant
Heating, tenant
Total, Tenant electric



Komfortanalyse

	Ref-modell	Ref-model1	Ref-model2	Ref-model3	Ref-model4
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in worst zone	0	0	0	0	0
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in average zone	0	0	0	0	0
Percentage of total occupant hours with thermal dissatisfaction	6	6	6	6	6

	Ref-model5	Ref-model6	Ref-model7	Ref-model8	Ref-model9
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in worst zone	0	0	0	0	0
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in average zone	0	0	0	0	0
Percentage of total occupant hours with thermal dissatisfaction	6	6	6	6	6

	Ref-mode10	Ref-mode11	Ref-mode12	Ref-mode13	Ref-mode14
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in worst zone	0	0	0	0	0
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in average zone	0	0	0	0	0
Percentage of total occupant hours with thermal dissatisfaction	6	6	6	6	6

	Ref-mode15	Ref-mode16	Ref-mode17	Ref-mode18	Ref-mode19
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in worst zone	0	0	0	0	0
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in average zone	0	0	0	0	0
Percentage of total occupant hours with thermal dissatisfaction	6	6	6	6	6

	Ref-mode20	Ref-mode21	Ref-mode22
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in worst zone	0	0	0
Percentage of hours when operative temperature is above 27°C in average zone	0	0	0
Percentage of total occupant hours with thermal dissatisfaction	7	6	6

Best comfort per metered energy: Ref-mode16

